

VENTILAÇÃO DA BASE DAS PAREDES PARA SECAGEM DE EDIFÍCIOS NA SEQUÊNCIA DE INUNDAÇÕES/CHEIAS

MARIA RAMOS MARTINS

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professora Doutora Ana Sofia Moreira dos Santos
Guimarães Teixeira

JUNHO DE 2015

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais e Irmã,

Audaces fortuna juvat

Virgílio

AGRADECIMENTOS

Ao concluir o presente trabalho quero manifestar o meu profundo e sincero agradecimento a todos os que contribuíram para a sua realização, fazendo destaque a algumas pessoas que direta ou indiretamente tiveram um papel fundamental na sua realização.

À Professora Ana Sofia Guimarães agradeço toda a disponibilidade, paciência e ajuda manifestadas na sua orientação;

Ao Engenheiro Óscar López a ajuda prestada, fundamental para a concretização deste trabalho.

Aos meus pais e irmã por tudo o que sempre me proporcionaram, o mais sincero agradecimento por estarem sempre do meu lado, por me apoiarem incondicionalmente em todas as etapas e por serem os pilares da minha vida;

Às minhas primas Margarida, Carla (e João), Paula, Luísa e Cristina por me terem ajudado a ultrapassar momentos difíceis, por sempre acreditarem em mim, bem como por estarem sempre presentes;

A alguns tios, o meu agradecimento pela confiança e orgulho que sempre me transmitiram e por serem quase meus pais;

Aos restantes primos e tios que, direta ou indiretamente, se mostraram sempre felizes pelas minhas conquistas;

À minha amiga Vivi, por todas as vivências e tempo juntas;

À minha amiga Mónica, por me ter acompanhado ao longo deste percurso e se tornar indispensável nos momentos mais importantes;

À minha amiga Rita, por estar na base do meu crescimento neste percurso;

Às amigas Joana S., Joana L., Diana, Marília, Teresa, Brito, pelos conselhos e boa disposição;

Aos colegas com os quais me cruzei e que foram essenciais para as aprendizagens adquiridas ao longo destes 5 anos.

RESUMO

Os edifícios do Património nacional são compostos por um elevado valor histórico e cultural sendo cada vez mais necessário preservá-los. A sua proximidade aos rios e a sua exposição às alterações climáticas torna-o cada vez mais vulnerável e constantemente ameaçado pelos fenómenos das inundações e cheias. Estudos acreditam que estes fenómenos serão agravados nos próximos anos e, por isso, será necessário adotar medidas preventivas que minimizem e controlem os efeitos adversos de modo a evitar o aparecimento de patologias nos edifícios.

Nos últimos anos foi desenvolvido no Laboratório de Física das Construções – LFC, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, uma técnica de tratamento de ventilação da base das paredes com o intuito de tratar o problema da humidade ascensional.

Com este trabalho pretende-se, através de simulações efetuadas no programa de cálculo automático WUFI 2D versão 3.3, validar esta técnica de tratamento mas, neste caso, na sequência de uma inundação ou cheia. Serão procuradas as melhores soluções em termos de caudal e geometria do sistema de ventilação e avaliada a influência da espessura da parede.

PALAVRAS-CHAVE: Inundações, Cheias, Património Nacional, Sistema de ventilação, Ventilação da base das paredes

ABSTRACT

Portuguese cultural heritage buildings have a great historic value and their preservation have turned into a very important issue. The proximity to the rivers and their exposure to the climate changes make them more vulnerable and are often threaten by floods. Previous studies believe this phenomenon will become worse in the following years; therefore, new preventive measures to minimise and control collateral damage and pathologies that might appear in the buildings are going to be essential in a near future.

In recent years, the Laboratory of Physics of the Constructions – L. F. C. in the College of Engineering of Porto University (FEUP) – developed an air vent method/technique for the walls base in order to prevent rising damp.

This thesis's goal is to validate the air vent technique through a flood simulation in the automatic calculus program WUFI 2D, version 3.3. The best solutions will be searched, related to the ventilation system's geometry and flow. Nevertheless, the influence of wall thickness will be evaluated and its importance for this method will be defined.

KEYWORDS: floods, Portuguese cultural heritage buildings, ventilation system, ventilation on the base of the wall

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS	1
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	2
2. AS INUNDAÇÕES E AS CHEIAS	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. CARACTERIZAÇÃO DOS CONCEITOS: CHEIA E INUNDAÇÃO	3
2.2.1. DISTINÇÃO CONCEPTUAL DE CHEIA E INUNDAÇÃO	3
2.2.2. TIPOS E CAUSAS DE INUNDAÇÕES	4
2.2.2.1. Bacias hidrográficas	5
2.2.3. INFLUÊNCIA DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NA OCORRÊNCIA DE INUNDAÇÕES	6
2.3. O PATRIMÓNIO NACIONAL	8
2.3.1. HISTÓRICO DE INUNDAÇÕES EM PORTUGAL	8
2.3.2. CARTAS DE RISCO REGIONAL	11
2.3.2.1. Região Norte	11
2.3.2.2. Região Centro	12
2.3.2.3. Região Sul	13
2.4. A PRESENÇA DE ÁGUA NOS MONUMENTOS	14
2.4.1. ENQUADRAMENTO	14
2.4.2. FORMAS DE MANIFESTAÇÃO DA HUMIDADE	14
2.4.2.1. Humidade por precipitação	14
2.4.2.2. Humidade de construção	15
2.4.2.3. Higróscopidade dos sais	15
2.4.2.4. Humidade de condensação	16
2.4.2.5. Humidade devido a causas fortuitas	17
2.4.2.6. Humidade ascensional	17

2.5. SISTEMA DE VENTILAÇÃO DA BASE DAS PAREDES - HUMIVENT	18
2.5.1. CAPILARIDADE VS INUNDAÇÃO	18
2.5.2. EVOLUÇÃO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO	20
2.5.3. HUMIVENT	21
2.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO	22

3. PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO WUFI 2D	25
3.1. INTRODUÇÃO	25
3.2. PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO	25
3.3. FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA APLICADO AO CENÁRIO DE SIMULAÇÃO	27
3.3.1. DESCRIÇÃO	27
3.3.2. INFORMAÇÃO DO PROJETO	28
3.3.3. GEOMETRIA	28
3.3.4. GRELHA	29
3.3.5. MATERIAIS	30
3.3.5.1. Material já existente na base de dados	31
3.3.5.2. Criação de novo material	32
3.3.6. CONDIÇÕES INICIAIS	34
3.3.7. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA NA INTERFACE / CLIMA	35
3.3.8. FONTES	39
3.3.9. PARÂMETROS COMPUTACIONAIS	40
3.3.10. CÁLCULO	41
3.3.11. RESULTADOS	42
3.4. SÍNTESE DO CAPÍTULO	43

4. SECAGEM DE EDIFÍCIOS NA SEQUÊNCIA DE INUNDAÇÃO/CHEIA COM E SEM UM SISTEMA DE VENTILAÇÃO NA BASE DAS PAREDES	45
4.1. INTRODUÇÃO	45
4.2. PROPRIEDADES DAS VARIÁVEIS NECESSÁRIAS PARA AS SIMULAÇÕES	45
4.2.1. INPUT'S	45
4.2.1.1. Propriedades dos materiais	46
4.2.1.2. Curva higroscópica	47

4.2.1.3. Clima exterior e interior	49
4.2.1.4. Espessura da parede	50
4.2.1.5. Geometria e número de renovações horárias do canal de ventilação	50
4.2.2. DEFINIÇÃO DA ALTURA MÁXIMA ATINGIDA PELA FRENTE HÚMIDA	52
4.3. CONFIGURAÇÕES DAS SIMULAÇÕES APRESENTADAS	52
4.4. GRANITO	55
4.4.1. COMPARAÇÃO DE CONFIGURAÇÕES COM E SEM SISTEMA DE VENTILAÇÃO	55
4.4.2. VARIAÇÃO DAS VELOCIDADES DE VENTILAÇÃO	63
4.4.3. VARIAÇÃO DA GEOMETRIA DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO	67
5.3. SÍNTESE DO CAPÍTULO	69
6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	71
6.1. CONCLUSÕES FINAIS	71
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Propriedades das bacias hidrográficas [6]	5
Fig. 2.2 – Influência da forma da bacia nos picos de cheia [7]	6
Fig. 2.3 – Influência do aumento da temperatura no ciclo hidrológico [8]	8
Fig. 2.4 – Cheia de Dezembro de 1909 e cheia de 1962	10
Fig. 2.5 – Cheia de 1979 e cheia de 2010	10
Fig. 2.6 – Mapa de risco de cheia da região Norte [3]	11
Fig. 2.7 – Distribuição do risco na região Norte [3]	11
Fig. 2.8 – Mapa de risco de cheia da região Centro [3]	12
Fig. 2.9 – Distribuição do risco na região Centro [3]	12
Fig. 2.10 – Mapa de risco de cheia da região Sul [3]	13
Fig. 2.11 – Distribuição do risco na região Sul [3]	13
Fig. 2.12 – Água introduzida nas paredes através do excesso de água nas argamassas [15]	15
Fig. 2.13 – Materiais não totalmente protegidos da chuva no estaleiro [15]	15
Fig. 2.14 – Pormenor da formação de eflorescências sobre tijolo-à-vista [15]	16
Fig. 2.15 – Condensações em zonas de pontes térmicas [15]	17
Fig. 2.16 – Aspeto de pormenor de fungos e bolores instalados em paramento, por efeito da condensação superficial [15]	17
Fig. 2.17 – Parede sujeita a fenómeno de humidade ascensional agravado pela impermeabilização parcial da face interior [15]	18
Fig. 2.18 – O fenómeno da capilaridade [16]	18
Fig. 2.19 – Humidificação por águas freáticas e superficiais [14]	19
Fig. 2.20 – a) Sistema instalado acima do nível freático [14]; b) Otimização do sistema [14]	20
Fig. 2.21 – Humidificação por humidade ascensional e inundação	22
Fig. 2.22 – Princípio do sistema de ventilação para a secagem de edifícios após uma inundação [19]	22
Fig. 3.1 – Ecrã principal	27
Fig. 3.2 – Barra de menus	27
Fig. 3.3 – Caixa de diálogo “Informação do projeto”	28
Fig. 3.4 – Caixa de diálogo “Geometria”	29
Fig. 3.5 – Conceito de malha	29
Fig. 3.6 – Grelha escolhida para a simulação	30
Fig. 3.7 – Caixa de diálogo para seleção de um material	31

Fig. 3.8 – Caixa de diálogo para escolha do material e respetivas propriedades	31
Fig. 3.9 – Caixa de diálogo para a conclusão de escolha do material	32
Fig. 3.10 – Método para abrir o WUFI Editor	32
Fig. 3.11 – Caixa de diálogo para a criar de um novo material	33
Fig. 3.12 – Caixa de diálogo par a criação de um novo material	33
Fig. 3.13 – Caixa de diálogo par a criação de um novo material	34
Fig. 3.14 – Condições iniciais.....	34
Fig. 3.15 – Condições fronteira na interface	35
Fig. 3.16 – Condições fronteira na interface	35
Fig. 3.17 – Secção “Surface Coefficients”	36
Fig. 3.18 – Secção “Climate”	37
Fig. 3.19 – Definição do clima.....	37
Fig. 3.20 – Ficheiro para simular a saturação da base	38
Fig. 3.21 – Ficheiro para simular as restantes interfaces	38
Fig. 3.22 – Condições fronteira definidas.....	39
Fig. 3.23 – Adicionar nova fonte.....	39
Fig. 3.24 – Características do sistema de ventilação.....	40
Fig. 3.25 – Características das fontes inseridas	40
Fig. 3.26 – Separador “simple” da caixa de diálogo parâmetros computacionais	41
Fig. 3.27 – Caixa de diálogo processamento no decorrer da simulação	41
Fig. 3.28 – Ver resultados	42
Fig. 3.29 – Resultados da simulação: temperatura, teor de humidade e humidade relativa.....	42
Fig. 3.30 – Teor de humidade num ponto específico do elemento em estudo.....	43
Fig. 4.1 – Percurso típico de uma curva higroscópica [26]	47
Fig. 4.2 – Comportamento higroscópico de materiais de construção em função da humidade relativa [14].....	47
Fig. 4.3 – Representação e pormenor da curva higroscópica do granito	48
Fig. 4.4 – Configuração do sistema de ventilação	50
Fig. 4.5 –Definição de hmax.....	52
Fig. 4.6 – Configuração A	55
Fig. 4.7 – Configuração B, C, D e E	56
Fig. 4.8 – Configuração A, B, C, D e E para b=0.20m	58
Fig. 4.9 – Configuração A, B, C, D e E para b=0.40m	57
Fig. 4.10 – Configuração A, B, C, D e E para b=0.60m	58

Fig. 4.11 – Configuração A, B, C, D e E para $b=0.80\text{m}$	59
Fig. 4.12 – Configuração A, B, C, D e E para $b=1\text{m}$	60
Fig. 4.13 – h_{max} das simulações numéricas. Configuração A	61
Fig. 4.14 – h_{max} das simulações numéricas. Configuração A, B, C, D e E	62
Fig. 4.15 – Configuração A, B, C, D e E	62
Fig. 4.16 – h_{max} para valor de renovação horária. $b=20\text{cm}$	64
Fig. 4.17 – h_{max} para valor de renovação horária. $b=100\text{cm}$	65
Fig. 4.18 – Representação do h_{max} , ao fim de dois anos de simulação, para $b=0.2\text{m}$ e $b=1\text{m}$, respetivamente	65
Fig. 4.19 – h_{max} para cada valor de renovação horária	66
Fig. 4.20 – h_{max} para cada geometria	67
Fig. 4.21 – h_{max} atingida para cada espessura	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Histórico de inundações/cheias em Portugal (adaptado de [3], [12] e [13])	8
Tabela 3.1 – Dados de entrada – Propriedades dos materiais	30
Tabela 4.1 – Propriedades dos materiais	46
Tabela 4.2 – Curva higroscópica do Granito [20].....	48
Tabela 4.3 – Velocidades e nº de renovações horárias de ventilação em estudo para um sistema de ventilação 20cm x 20cm	51
Tabela 4.4 – Configurações geométricas analisadas	53
Tabela 4.5 – Combinações das simulações	55
Tabela 4.6 – Velocidades testadas nas simulações	64
Tabela 4.7 – Esquematização das conclusões finais	69

SÍMBOLOS

θ_i : Temperatura do paramento interior ($^{\circ}\text{C}$)

t_i, t_e : Temperaturas do ar, interior e exterior ($^{\circ}\text{C}$)

$\frac{1}{h_i}$: Resistência térmica superficial interior ($\text{m}^2\text{C}/\text{W}$)

U : Coeficiente de transmissão térmica $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$

$\frac{dH}{dT}$: Capacidade de armazenamento de calor do material húmido ($\text{J}/(\text{m}^3.\text{K})$)

$\frac{dw}{d\phi}$: Capacidade de armazenamento de humidade do material húmido (kg/m^3)

λ : Condutibilidade térmica do material húmido ($\text{W}/(\text{m}.\text{K})$)

h_v : Entalpia de evaporação da água (J/kg)

D_ϕ : Coeficiente de condução líquida ($\text{kg}/(\text{m}.\text{s})$)

δ_p : Permeabilidade ao vapor de água do material ($\text{kg}/(\text{m}.\text{s}.\text{Pa})$)

T : Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

w : Teor de humidade do material (kg/m^3)

ϕ : Humidade relativa (-)

p_{sat} : Pressão de saturação do vapor de água (Pa)

Q : Caudal (m^3/s)

u : Velocidade (m/s)

A : Área da secção (m^2)

h_{max} : Valor da altura máxima atingida pela frente húmida

Rph : Número de renovações por hora (h^{-1})

V : Volume (m^3)

L : Comprimento do canal (m)

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A água é um dos principais agentes de degradação dos edifícios penetrando de diversas formas e através de diversos mecanismos tratando-se portanto de um fator de risco para o Património Monumental. Desta forma, o estudo das suas consequências é cada vez mais importante para o tratamento e prevenção das patologias associadas.

Desde sempre que a humidade nos edifícios tem suscitado dúvidas tratando-se de um assunto com grande interesse. Contudo, não são muitos os estudos que permitem analisar este fenómeno. Sendo a humidade ascensional uma das maiores causas deste problema, começaram a ser desenvolvidos estudos para o tratamento da envolvente dos edifícios face a esta questão.

A sensibilização para este assunto começa a crescer nomeadamente ao nível do património português. Como se tratam de edifícios históricos com elevado significado, é cada vez maior a necessidade de os proteger destes fenómenos. Assim surgiu o conceito de sistema de ventilação na base das paredes como forma de proteção e tratamento destes edifícios históricos. Inicialmente estudado e analisado para o controlo de humidade ascensional, tenciona-se agora prosseguir com esse estudo mas, desta vez, abordar a sua aplicabilidade na sequência de uma inundação.

Com o intuito de tomar medidas no sentido de salvaguardar o património, serão aprofundados os conhecimentos sobre o fenómeno das inundações/cheias e os seus efeitos nos monumentos históricos. Recorrendo ao auxílio dum programa de cálculo automático, serão simuladas várias características do sistema de ventilação bem como a espessura da parede, de forma a encontrar a melhor resposta ao problema exposto.

Para tirar resultados e conclusões é importante conhecer a informação existente sobre esta técnica inovadora do sistema de ventilação. Serão então apresentados os principais conceitos bem como a análise dos estudos já realizados.

1.2. OBJETIVOS

Existem já diversos estudos que enunciam as diversas formas de manifestação de humidade, causas associadas e fatores que são determinantes para o seu aparecimento e progressão. As técnicas de tratamento de patologias associadas à humidade ascensional nos Monumentos têm vindo a ser desenvolvidas apresentando resultados satisfatórios.

Foi recentemente validada uma técnica de tratamento da humidade ascensional designada por “ventilação da base das paredes”. Tem como objetivo prevenir e tratar este problema abrangendo todas as particularidades que as paredes do património nacional apresentam.

O principal objetivo deste trabalho passa por analisar a técnica da ventilação da base das paredes associada à humidade proveniente de uma inundação. Pretende-se avaliar a sua eficácia como:

- Efetuar a comparação de uma parede em estudo com e sem a aplicação do sistema na sua base;
- Variar determinadas propriedades de modo a entender as que apresentam maior e menor influência no estudo;
- Estudar várias configurações do sistema (geometria e velocidade) com o intuito de encontrar aquela que traduza uma melhor solução.

1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. O primeiro capítulo consta de uma parte introdutória onde são apresentados o enquadramento do tema escolhido, os objetivos inerentes à sua realização e a estruturação da mesma.

Os três capítulos seguintes, referentes ao corpo principal do trabalho, são divididos em:

- Capítulo 2 de carácter essencialmente teórico onde serão definidos os conceitos de cheia, de inundação e de bacia hidrográfica. Apresenta-se o histórico de inundações em Portugal e são descritas e exemplificadas as diferentes formas de manifestações da humidade. Neste capítulo é ainda introduzido o conceito do sistema de ventilação, a sua evolução e enquadramento para o estudo que irá ser realizado.
- Capítulo 3 também de carácter teórico onde é apresentado o funcionamento do programa de cálculo utilizado, WUFI 2D, e os passos que devem ser seguidos para se proceder a uma simulação de uma parede saturada e respetiva secagem com e sem o sistema de ventilação. Para uma melhor compreensão optou-se por não generalizar e apresentar uma simulação específica do trabalho.
- Capítulo 4 dividido em duas partes: uma de carácter informativo que descreve os parâmetros escolhidos, os valores inseridos e as configurações que irão ser estudadas e simuladas e uma segunda parte onde são apresentados todos os resultados recolhidos e conclusões obtidas.

Por último, no Capítulo 5, expõem-se as conclusões finais do trabalho desenvolvido bem como possíveis desenvolvimentos futuros que seriam interessantes para dar uma continuidade ao estudo apresentado nesta dissertação.

2

AS INUNDAÇÕES E AS CHEIAS

2.1. INTRODUÇÃO

As alterações climáticas influenciam a manifestação e a gravidade dos riscos naturais no domínio da hidrologia como as cheias e as inundações. Estas ocorrem principalmente na sequência de fenómenos de precipitação extrema e de frequência variável que, de forma natural ou induzida pela ação humana, podem resultar na submersão de terrenos usualmente emersos. Estes fenómenos hidrológicos não são possíveis de evitar e podem ser potencialmente perigosos, dependendo da magnitude atingida (altura da água e caudais), da velocidade com que progridem e da frequência com que ocorrem.

Embora os conceitos de inundação e cheia sejam entendidos como sinónimos é necessário distingui-los e perceber a sua influência nas construções no património nacional. É cada vez mais importante o seu estudo uma vez que os edifícios estão cada vez mais expostos ao fenómeno. A humidade, que por capilaridade atinge e progride no interior dos elementos de construção, é considerada uma das maiores causas de degradação das construções sendo por este motivo fundamentalmente prevenir e tratar o problema.

2.2. CARACTERIZAÇÃO DOS CONCEITOS: CHEIA E INUNDAÇÃO

2.2.1. DISTINÇÃO CONCEPTUAL DE CHEIA E INUNDAÇÃO

Todas as cheias causam inundações mas nem todas as inundações são causadas por cheias sendo então importante diferenciar os conceitos. Dentro das causas meteorológicas, a pluviosidade é a principal causa destes fenómenos.

Muitas abordagens podem ser feitas para o conceito de cheia mas todas se resumem ao mesmo fenómeno, fenómeno esse que tem como causas condições meteorológicas ou fatores humanos.

As cheias são fenómenos naturais extremos e temporários, provocados por precipitações contínuas e prolongadas ou repentinas e de elevada intensidade [1].

No primeiro caso, com duração de semanas a meses, não é atingida uma grande intensidade mas o solo é levado a uma saturação tal que ocorrem fenómenos de transbordo [2].

No segundo caso a chuva já é de grande intensidade dando origem às cheias rápidas e às inundações urbanas. O excesso de precipitação faz aumentar o caudal dos cursos de água, originando o extravase do leito normal. Estes transbordamentos, associados a sistemas de drenagem incapacitados de absorver toda a água, provocam a cheia [2].

O uso e ocupação pelo Homem da bacia hidrográfica têm também impacto na severidade e consequências desses acontecimentos. Para além dos fenómenos meteorológicos, as cheias podem ainda ser causadas pela rotura de barragens, geralmente de propagação muito rápida [1].

As inundações são fenómenos hidrológicos extremos, de frequência variável, naturais ou induzidos pela ação humana, que consistem na submersão de uma área usualmente emersa. Não só têm como causa as cheias como também a acelerada ocupação do solo em Portugal que faz com que a ocorrência de inundações seja cada vez mais frequente. Quando as formas de escoamento não são suficientes e o solo não tem capacidade de absorver toda a água de precipitação, há uma saturação dando origem a uma inundação.

O termo inundação será utilizado para analisar as consequências que uma cheia pode trazer aos elementos e materiais da construção em Portugal.

2.2.2. TIPOS E CAUSAS DE INUNDAÇÕES

As inundações podem ser classificadas segundo o tempo e segundo o espaço.

Relativamente à classificação em relação ao espaço, as inundações podem ser divididas em quatro tipos [2]:

- (i) Inundações fluviais ou cheias
- (ii) Inundações de depressões topográficas
- (iii) Inundações costeiras
- (iv) Inundações urbanas

As alterações que vão sendo introduzidas nas bacias e nas linhas de água (uso do solo, obras, urbanizações intensas, etc) reforçam cada vez mais a necessidade de ter a perceção do risco de inundações e concretizar medidas para reduzir a sua probabilidade e as suas potenciais consequências. Para tal, é importante entender o que está na base de cada tipo de inundação.

- (i) As inundações fluviais, mais conhecidas como cheias, têm origem na precipitação abundante, numa fusão da neve ou gelo, no assoreamento dos rios (acumulação de diferentes materiais nos leitos como, por exemplo, areia) ou nas tempestades com origem no mar, acompanhadas de chuvas intensas e grandes ondas.
- (ii) As inundações de depressões topográficas, para além de poderem ser devidas à subida do nível freático (natural ou artificial), podem também ser provocadas pela retenção de água da precipitação por um solo ou substrato geológico de permeabilidade muito reduzida [2].
- (iii) Relativamente às inundações costeiras, tal como o nome sugere, têm como causa fenómenos provocados na costa. São causadas por tsunamis ou maremotos, pela subida estática do nível do mar e por sismos com fenómenos de subsidência tectónica. Estão também associadas à *storm surge*, que corresponde a um aumento do nível das águas do mar como resultado da diminuição da pressão atmosférica e dos ventos ciclónicos. Afetam praias e estruturas costeiras [2], [3].
- (iv) A chuva intensa associada a uma sobrecarga dos sistemas de drenagem artificiais dá origem às inundações urbanas. Isto acontece porque, com o desenvolvimento urbano, há uma impermeabilização do solo através de telhados, ruas de calçada, poucos espaços verdes, entre outros. Com a urbanização, o volume de água que deveria ser escoado pela superfície do solo fica retido na vegetação, passando a escoar no canal do sistema de drenagem, exigindo maior capacidade de escoamento das secções. A subida do nível freático natural ou artificial é também uma fonte para as inundações urbanas.

Apesar de haver vários motivos para a ocorrência deste fenómeno, segundo Ramos [2] em Portugal, a maioria das inundações são de origem meteorológica, como:

- Cheias lentas dos grandes rios;
- Cheias rápidas dos rios e ribeiras de pequenas e médias bacias hidrográficas;
- Subida das águas subterrâneas em locais topograficamente deprimidos;
- Inundações devidas à sobrecarga dos sistemas de drenagem artificiais nos meios urbanos.

Relativamente ao tempo, as inundações podem ser classificadas como [4]:

- rápidas (com grande intensidade);
 - lentas (com precipitações abundantes ao longo de vários dias ou semanas).
- As rápidas ocorrem normalmente em regiões de relevo acentuado e montanhoso. Acontecem pela presença de grande quantidade de água num curto espaço de tempo. A grande quantidade de água e materiais arrastados representam, à medida que escoam, grande poder destruidor. Chuvas fortes ou moderadas, mas duradouras (intensas), podem também originar inundações repentinas, quando o solo esgota a sua capacidade de infiltração. Estas estão associadas a bacias hidrográficas de pequenas dimensões [4].
 - Nas inundações lentas, a água eleva-se de forma pausada e previsível mantendo-se em situação de cheia durante algum tempo escoando gradualmente. Normalmente, as inundações são cíclicas e nitidamente sazonais. Este tipo de inundação já está associado a bacias hidrográficas de grande dimensão [4].

2.2.2.1. Bacias hidrográficas

Entende-se por bacia hidrográfica o conjunto de terra na qual ocorre a captação de água – drenagem – de precipitação para um rio principal e seus afluentes [5].

Se a bacia for pequena e se a precipitação for muito intensa pode ocorrer uma cheia rápida. Se as chuvas forem intensas e prolongadas em bacias grandes, as cheias são lentas e correspondem ao aumento progressivo do caudal do rio [6].

Existem fatores que devem ser tidos em conta relativamente às bacias hidrográficas uma vez que condicionam as cheias dando origem, posteriormente, a inundações [6]. (Ver figura 2.1)

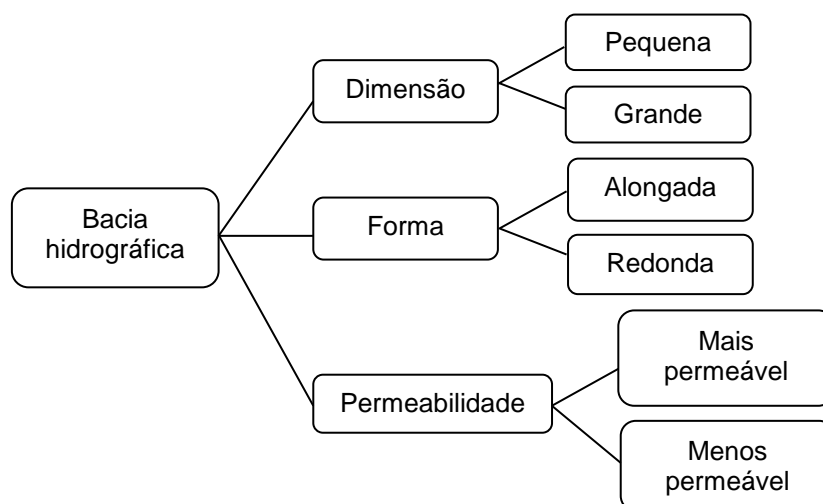


Fig. 2.1 – Propriedades das bacias hidrográficas [6]

Tomando a dimensão da bacia hidrográfica como fator de influência nas cheias, sabe-se que se uma bacia for de grandes dimensões, origina caudais elevados e picos de cheia espaçados no tempo, uma vez que necessita de grandes quantidades de água. Por outro lado, se a bacia for pequena, vai promover mais facilmente o pico de cheia. Isto porque o escoamento se faz de uma forma mais rápida uma vez que os cursos de água de pequena dimensão têm tempos de resposta baixos - apenas algumas horas. Em declives acentuados predomina o escoamento superficial ao contrário de declives menos acentuados em que a infiltração é predominante [6].

Quanto à forma da bacia, pode-se dizer que, se for alongada, capta menos água originando um escoamento mais lento, na medida que a precipitação irá recair por várias bacias. Com uma forma mais arredondada, há uma melhor captação da água devido à precipitação localizada, sendo provável que a massa de ar precipite unicamente sobre esta bacia (figura 2.2) [6].

As cheias também são condicionadas pelas características geomorfológicas da bacia hidrográfica uma vez que o total de precipitação verificada na área da bacia vai, por um lado infiltrar-se no solo e por outro, escorrer superficialmente. Nas bacias hidrográficas de carácter mais permeável, ou com uma cobertura vegetal expressiva, ocorrem cheias menores pois a quantidade de água intercetada durante as grandes chuvadas é pouco significativa [6].

Também as características dos leitos podem influenciar uma cheia uma vez que o mesmo caudal pode provocar diferentes alturas de escoamento e de velocidade das águas. O leito normal correspondente ao leito menor de um curso de água, dependendo da sua forma, rugosidade, largura, profundidade e da sua inclinação longitudinal, comporta o escoamento de caudais de pequenas cheias, de carácter anual. O leito de cheia que corresponde ao leito maior (dependendo igualmente das características do leito normal) tem capacidade para escoar caudais de cheias elevados. Contudo a direção do escoamento dá-se de uma forma mais livre, podendo haver escoamento [6].

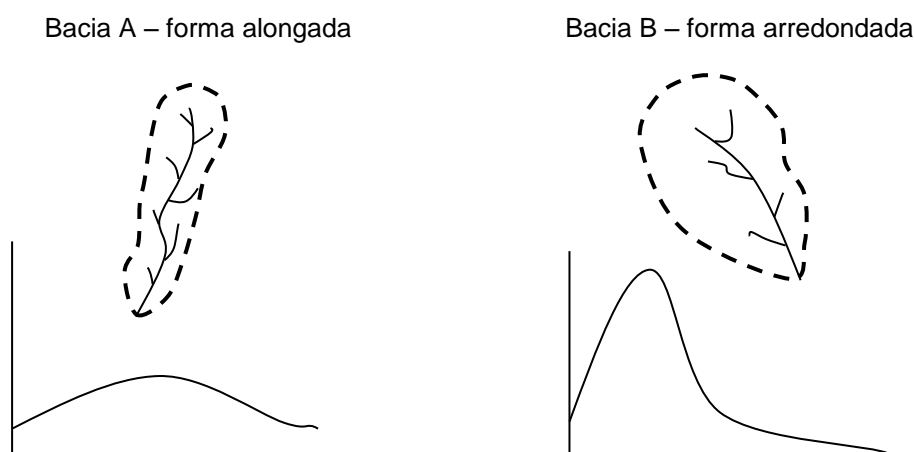


Fig. 2.2 – Influência da forma da bacia nos picos de cheia [7]

2.2.3. INFLUÊNCIA DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NA OCORRÊNCIA DE INUNDAÇÕES

“O clima da Terra tem estado sempre sujeito ao risco de inesperadas e progressivas alterações climáticas devidas quer a fatores exteriores à atmosfera terrestre, tais como a modificação da órbita do nosso planeta e a quantidade de radiação solar e cósmica, quer a processos naturais que ocorrem na própria atmosfera, nos oceanos, na vegetação e nos glaciares.” [8]

O comportamento do clima é determinante na análise de riscos associados a certos fenómenos naturais. Como muitos dos riscos naturais nos domínios da meteorologia, hidrologia e geodinâmica externa são motivados pelas variáveis climáticas, a probabilidade e a gravidade da manifestação destes riscos são influenciadas pelas alterações climáticas.

As alterações climáticas têm vindo a ser identificadas como uma das maiores ameaças ambientais, sociais e económicas que o planeta e a humanidade enfrentam na atualidade [3] e têm vindo a contribuir para um aumento da probabilidade de ocorrência de inundações e do respetivo impacto negativo. Quando se tenta caracterizar estas alterações, tenta-se encontrar alterações nas variáveis temperatura, precipitação e vento ao longo do tempo e, a partir daí, analisar as consequências que podem advir. Torna-se então necessário compreender as novas e futuras tendências destas principais variáveis.

O aquecimento global é um fator determinante na avaliação da evolução da temperatura. A temperatura é um efeito desencadeador de catástrofes naturais. É a partir do aquecimento da superfície que se desencadeiam fatores que levam às inundações. Estudos realizados indicam que a alteração da temperatura atmosférica e oceânica trará consequências para a evaporação e humidade do ar [9]. Esta situação acarreta consequências ao nível de situações hidrológicas como é o caso do aumento das chuvas mais intensas.

Podem-se então identificar algumas consequências da influência destes parâmetros.

- Se não existissem emissões de Gases de Efeito de Estufa, a temperatura seria mais baixa 2°C do que a atual. Nos últimos 70 anos, houve um aumento de 0,6° a 2°C nomeadamente a partir da segunda metade do século XX, prevendo-se que nos próximos 100 anos haja uma ascensão entre 1° a 3,5°C [8].
- Com o aumento da temperatura a água é aquecida. Simultaneamente, o aquecimento global provoca a fusão dos lençóis de gelo e dos glaciares polares. Estes dois fenómenos combinados acarretam a subida do nível do mar que tem como resultado a inundação e a erosão de zonas costeiras e de baixa altitude [10].
- O aumento das temperaturas oceânicas influencia o ciclo hidrológico. Assim, ocorrerão alterações na distribuição da evaporação, nebulosidade, condensação e precipitação, com mudança dos regimes térmicos e pluviométricos [9].
- As tempestades provocadas pela passagem de frentes frias influenciam os caudais de pico de cheia, ou seja, as características das tempestades (como a quantidade e o tipo de precipitação) influenciam o comportamento das bacias hidrográficas.

Podem distinguir-se dois episódios [6]:

- De passagem lenta, com movimentos convectivos, que pode colocar a precipitação num único local.
- De passagem rápida. Poderá apenas ter alguma consequência se for rápida e intensa.

Na figura 2.3 analisam-se, de uma forma sintética, as consequências que o aumento da temperatura provoca tanto ao nível da escala regional como global.

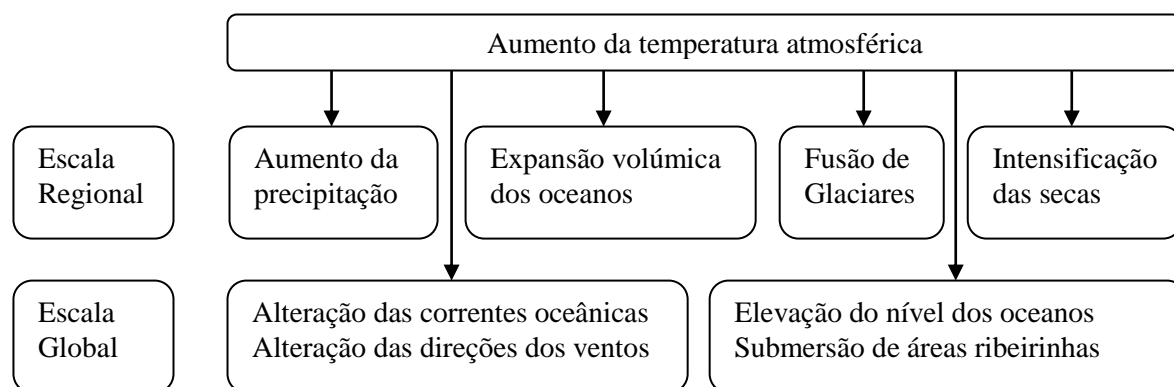


Fig. 2.3 – Influência do aumento da temperatura no ciclo hidrológico [8]

Estudos efetuados apontam para um aumento das alterações climáticas em Portugal. As temperaturas médias mínimas irão descer entre 0.5 a 2°C e as máximas poderão ter um acréscimo até aos 9°C [11].

Prevê-se uma redução progressiva do escoamento dependente da sua variação. Haverá um forte aumento de precipitação no Inverno e um decréscimo no resto do ano despertando fenómenos naturais como as secas e as cheias [11].

2.3. O PATRIMÓNIO NACIONAL

2.3.1. HISTÓRICO DE INUNDAÇÕES EM PORTUGAL

Considera-se fundamental analisar fenómenos da inundação com o intuito de perceber qual o seu papel nas patologias que causam no Património Nacional. Pretende-se estudar a forma como a água penetra e afeta os monumentos do nosso país. A maioria das inundações em Portugal são provocadas por cheias, situações de chuva intensa associadas a condições de instabilidade atmosférica que ocorrem geralmente do Outono à Primavera.

De acordo com o Emergency Events Database [12] e aliando a informação recolhida [13] é possível recolher o registo das inundações mais representativas que ocorreram em Portugal, desde 1900 até aos dias de hoje. De uma forma sucinta, a tabela 2.1 numera esses acontecimentos.

Tabela 2.1 – Histórico de inundações/cheias em Portugal (adaptado de [3], [12] e [13])

Data	Localização	Características
17 a 24 de Dezembro de 1909	Porto – Rio Douro	Subiram as águas do Douro durante dias devido a uma precipitação consecutiva.
29 de Janeiro de 1948	Vários rios do país	As mais generalizadas em Portugal, por se terem verificado em quase todos os rios do país

2 de Janeiro de 1962	Rios Mondego e Douro	O Norte e Centro do País são afetados por cheias violentas, as quais incidiram principalmente nos rios Mondego e Douro, tendo-se neste rio registado a 2ª maior cheia do século XX.
25 de Novembro de 1967	Rio Tejo	Precipitação excecional na região de Lisboa provocou cheias súbitas com consequências trágicas: elevado número de mortes, destruição de casas e estradas.
Fevereiro de 1979	Rio Tejo	Cheia no rio Tejo considerada a maior cheia do século XX. Embora tenha afetado todo o vale do Tejo, teve especial incidência no distrito de Santarém. Durou 9 dias.
29 de Dezembro de 1981	Lisboa	A 29 de Dezembro ocorreram chuvas intensas na região de Lisboa, que afetaram também outras zonas do país, bem como o oeste de Espanha, tendo originado cheias violentas.
Novembro de 1983	Rio Tejo	Forte pluviosidade concentrada origina cheias violentas na região de Lisboa, Loures e Cascais.
Dezembro de 1989	Rios Tejo e Douro	Verificaram-se cheias nos rios Tejo e Douro atingindo um caudal muito elevado na Régua.
26 de Outubro de 1997	Monchique	A 26 de Outubro de 1997 precipitação muito intensa durante quatro horas na zona de Monchique provocou uma cheia violenta que atingiu a localidade, provocando elevados prejuízos materiais em habitações, viaturas e equipamentos.
6 de Novembro de 1997	Baixo Alentejo	A 6 de Novembro de 1997 ocorreu no Baixo Alentejo uma precipitação muito intensa ocasionando cheias nos concelhos de Ourique, Aljustrel, Moura e Serpa.
Inverno 2000/2001	Rios Douro e Tejo	O Inverno de 2000/2001 foi excecionalmente chuvoso, tendo ocorrido cheias consecutivas entre os meses de Dezembro e Março. Os distritos mais afetados foram os de Vila Real, Porto e Santarém. A situação de elevada saturação dos solos devido à precipitação contínua causou diversas movimentações de massa que provocaram mortos e desalojados. A zona a jusante de Coimbra ficou alagada durante quase uma semana, com especial incidência para o concelho de Montemor-o-Velho. No dia 3 de Março a ponte Hintze Ribeiro, em Entre-os-Rios, colapsou devido aos intensos caudais dos rios Douro e Tâmega.
20 de Fevereiro de 2010	Ilha da Madeira	Uma massa de ar muito húmida e instável deixou na Ilha da Madeira elevados valores de precipitação num curto espaço de tempo, provocando inundações e derrocadas.

Verifica-se que a ocorrência de inundações em Portugal tem uma forte sazonalidade, decorrendo essencialmente durante o semestre húmido (entre Outubro a Março). Segundo algumas análises, é possível afirmar que 70% destes fenómenos ocorrem nos meses de Novembro, Dezembro, Janeiro e Fevereiro.

Pelo histórico de Portugal é também possível concluir que a maioria das inundações são devidas a cheias que ocorrem nas bacias hidrográficas dos grandes e médios rios afetando principalmente o centro do país.

Para além destas referências, ocorreram ainda alguns episódios pontuais, com uma gravidade reduzida. Em Fevereiro de 1978 fortes temporais fizeram avançar as águas marinhas sobre o litoral inundando espaços urbanos perto de Aveiro. A 8 de Janeiro de 1996 deu-se a ocorrência de uma cheia no norte e no centro do país e, a 22 de Dezembro desse mesmo ano, também se verificou uma cheia após o preenchimento da capacidade de armazenamento das albufeiras (figuras 2.4 e 2.5).



Fig. 2.4 – Cheia de Dezembro de 1909 e cheia de 1962

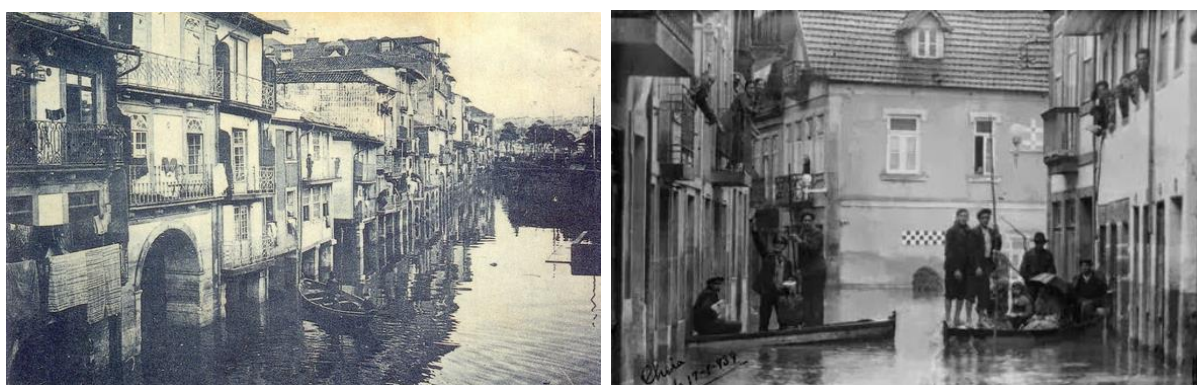


Fig. 2.5 – Cheia de 1979 e cheia de 2010

2.3.2. CARTAS DE RISCO REGIONAL

Com base no estudo realizado por Ana Dias [3] é possível identificar os monumentos de Portugal Continental que apresentam um maior e menor risco de cheia. A análise é dividida em Norte, Centro e Sul do país para uma melhor perceção dos monumentos em risco e dos rios existentes em cada zona. Foram apenas considerados monumentos classificados e foram retirados edifícios em ruínas ou não habitáveis.

2.3.2.1. Região Norte

Viana do Castelo, Braga, Porto, Vila Real e Bragança são distritos da Região Norte do país assim como parte dos distritos de Aveiro, Viseu e Guarda. Na figura 2.6 apresenta-se o mapa de risco de cheia para esta região.

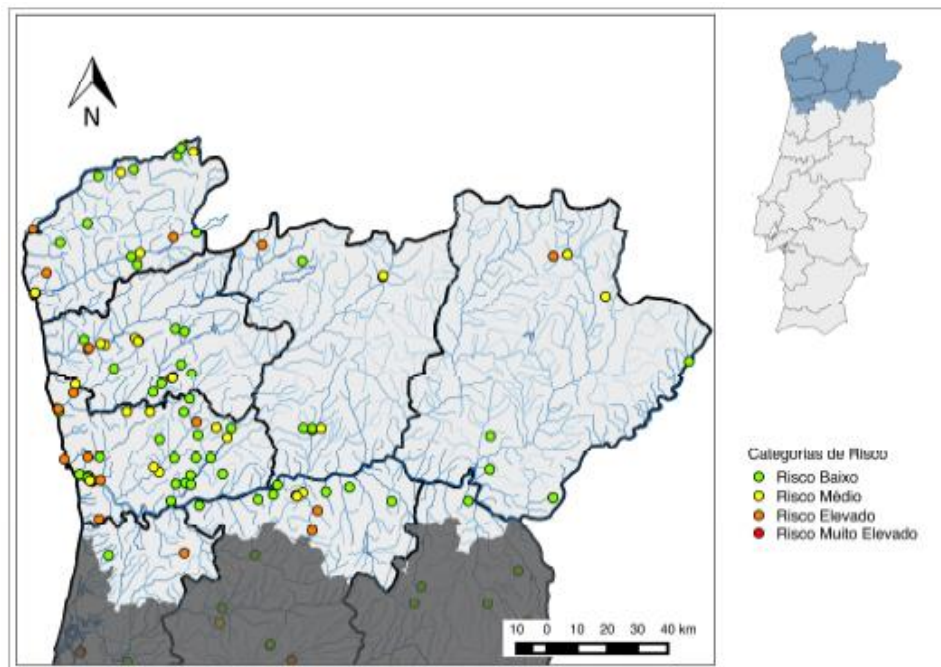


Fig. 2.6 – Mapa de risco de cheia da região Norte [3]

A figura 2.7 apresenta a distribuição de resultados [3] onde mais de metade dos monumentos da região Norte apresentam um risco de cheia baixo havendo no entanto cerca de 15 % de risco elevado e 28% de risco médio.

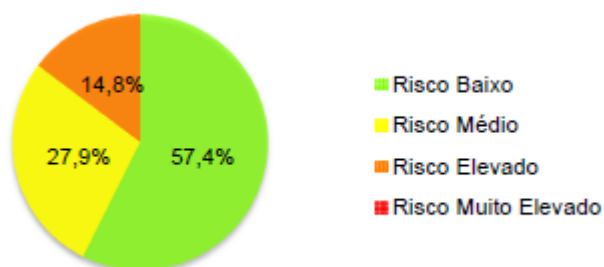


Fig. 2.7 – Distribuição do risco na região Norte [3]

2.3.2.2. Região Centro

Parte dos distritos de Aveiro, Viseu, Guarda, Lisboa e Santarém fazem então parte da região Centro tal como Coimbra, Castelo Branco e Leiria. Na figura 2.8, apresenta-se o mapa de risco de cheia desta região.

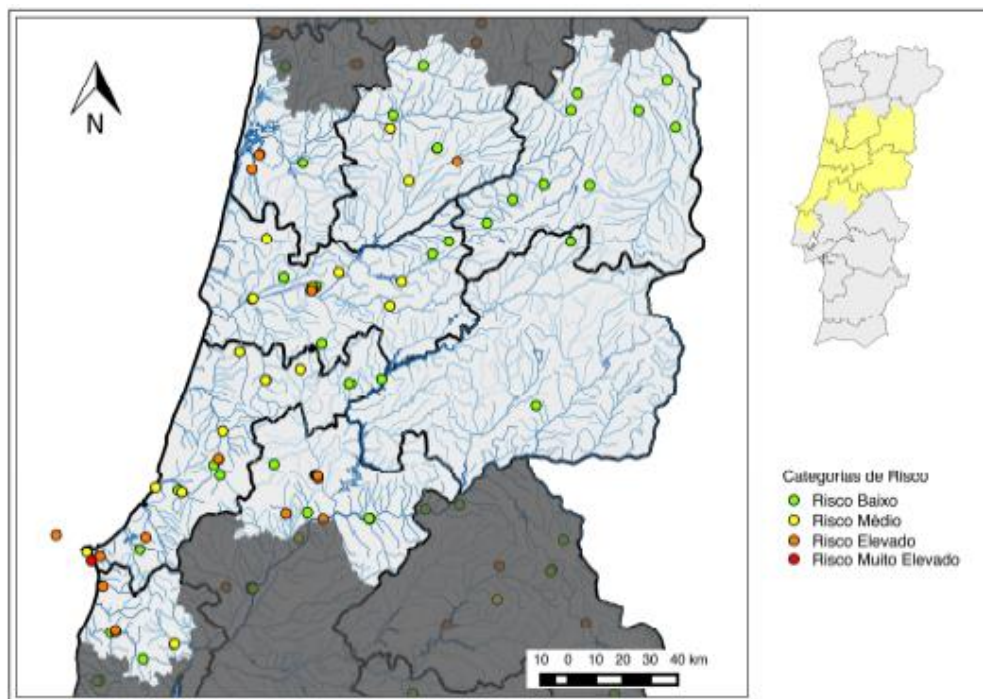


Fig. 2.8 – Mapa de risco de cheia da região Centro [3]

A figura 2.9 apresenta a repartição do risco pelas diferentes categorias, para a região Centro [3]. Verifica-se que os valores não são muito diferentes dos da região Norte, com 54% de risco baixo, 30% de risco médio, 15% de risco elevado e apenas 1% de risco muito elevado.

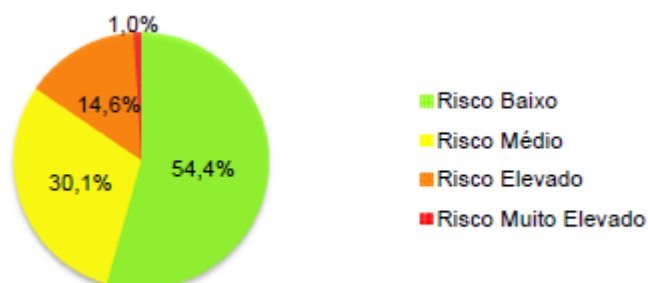


Fig. 2.9 – Distribuição do risco na região Centro [3]

2.3.2.3. Região Sul

A região Sul é constituída pelos distritos de Portalegre, Setúbal, Évora, Beja, Faro e parte dos distritos de Lisboa e Santarém. A carta de risco de cheia obtida para esta região é apresentada na figura 2.10.

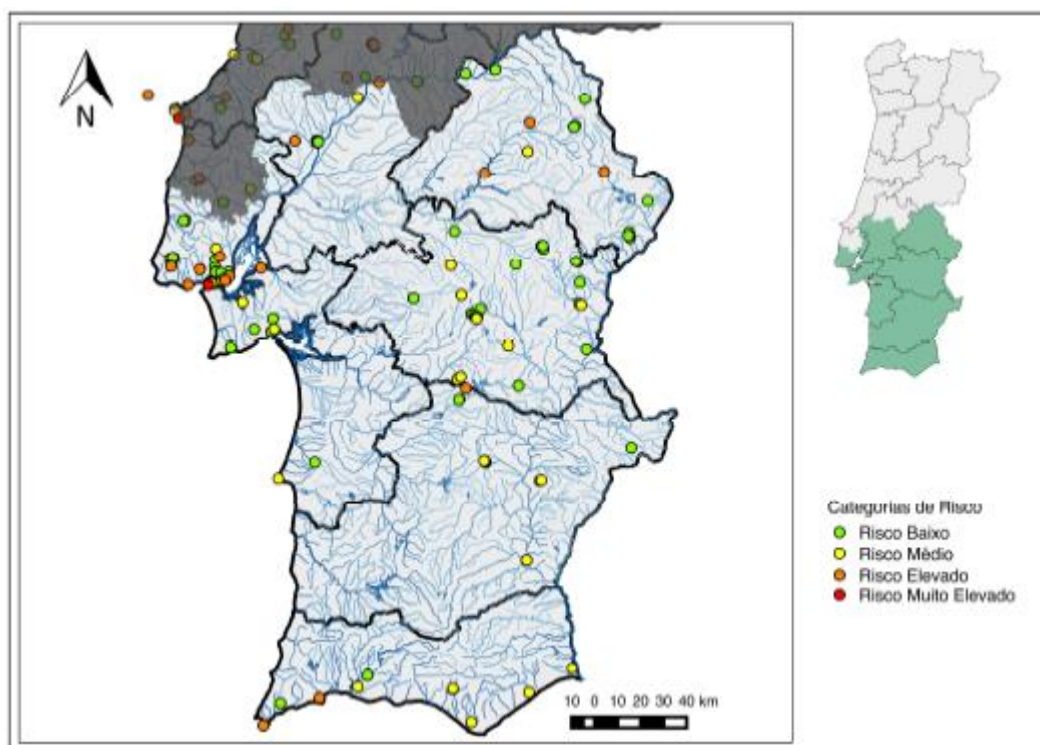


Fig. 2.10 – Mapa de risco de cheia da região Sul [3]

Relativamente à região Sul, verifica-se ser a região que apresenta uma percentagem de risco baixo mais elevada e onde as percentagens são inferiores às das regiões anteriores com cerca de 69% de risco baixo, 23% de risco médio e 8% de risco elevado. Figura 2.11

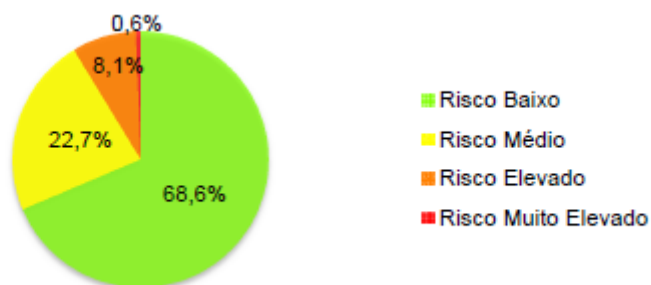


Fig. 2.11 – Distribuição do risco na região Sul [3]

2.4. A PRESENÇA DE ÁGUA NOS MONUMENTOS

2.4.1. ENQUADRAMENTO

A estabilidade, a durabilidade e o bom funcionamento são características e parâmetros que os elementos construtivos devem manter, principalmente os monumentos nacionais que devem ser preservados. Para tal é necessário criar condições que permitam prevenir, ou mesmo eliminar, as patologias que possam surgir.

A água está presente em três estados físicos: sólido, líquido e gasoso, onde o estado líquido cobre três quartos do planeta. No que toca à degradação dos edifícios, a água é o maior agente de degradação uma vez que, manifestando-se de diversas maneiras, dá origem a humidades presentes nas construções.

Os monumentos são parte integrante do património Nacional e são bastante afetados pela humidade devido não só à sua constituição mas também à sua localização. As fachadas são normalmente de pedra o que significa que são porosas, e consequentemente permeáveis à água. Tratam-se de materiais de elevada capilaridade que, em contacto com o solo, absorvem água onde predominam os sais. A sua considerável espessura é também uma questão particular destas construções. Quanto maior é a espessura da parede, maior é a área de absorção da mesma e pior a manifestação. Estes edifícios muitas vezes também se encontram construídos junto a rios, aumentando a sua exposição ao risco de cheias [14].

A sensibilização deste tema é cada vez maior em Portugal sendo necessário tomar precauções, analisar os riscos e garantir a proteção do património Nacional.

2.4.2. FORMAS DE MANIFESTAÇÃO DA HUMIDADE

A humidade pode surgir tanto na fase de construção como posteriormente durante a sua utilização. É então importante que não se agrave para não comprometer a durabilidade dos materiais, a alteração de propriedades e a saúde dos utilizadores [15].

As anomalias com origem na humidade podem-se manifestar de várias formas assim como as manifestações/identificações podem ser detetados por ensaios ou observação direta. Por alguns desses indícios serem comuns a várias anomalias, por vezes o diagnóstico é complexo e torna-se difícil identificar o problema da humidade. Para se proceder a uma correta reparação, é necessário conhecer as várias formas de manifestação de humidade e caracterizá-las.

2.4.2.1. Humidade por precipitação

A precipitação não causa por si só esta situação pois as paredes não estão muitas vezes expostas diretamente à água da chuva. É devido à força de vento e à sua direção que a água assume uma trajetória horizontal, escorrendo desta forma diretamente nas paredes.

Independentemente dos anos que a construção tem, a humidade aparece devido a erros de conceção ou de manutenção. Quando as gotas de água incidem diretamente em fissuras, juntas mal vedadas ou quando o revestimento se encontra deteriorado, a parede fica sujeita à presença de água começando a infiltrar-se e a causar problemas de humidade.

A anomalia pode ser identificada na parte interior das paredes exteriores através do aparecimento de manchas, bolores e eflorescências que se manifestam normalmente no período de inverno mas que se

mantêm durante todo o ano. Está normalmente localizada junto a janelas e em zonas de fissuração [15].

2.4.2.2. Humidade de construção

A humidade na construção corresponde à presença de água nos materiais durante a fase de construção. Muitas vezes é introduzida nas paredes devido ao excesso de água nas argamassas (figura 2.12). Se não forem garantidas as medidas de secagem necessárias, os materiais permanecem húmidos durante a execução do edifício, causando problemas de humidade. Para além disso, se durante a construção esta não se encontrar protegida em períodos de precipitação tal como acontece na figura 2.13, os materiais ficam expostos e sujeitos à água.

Só ao fim de um período longo de tempo é que começam a aparecer as consequências desta anomalia dependendo do uso e da localização (diferentes condições climáticas). Contudo, se a construção for inferior a 2 anos, é muito provável a ocorrência desta patologia uma vez que não houve tempo necessário para o processo de secagem dos materiais. As anomalias, devido ao excesso de humidade e à sua evaporação, podem ir desde o aparecimento de manchas até ao destaque de alguns materiais [15].



Fig. 2.12 – Água introduzida nas paredes através do excesso de água nas argamassas [15]



Fig. 2.13 – Materiais não totalmente protegidos da chuva no estaleiro [15]

2.4.2.3. Higroscopicidade dos sais

Os sais estão presentes em qualquer tipo de construção quer seja nos materiais quer seja no solo. Estes sais, combinados com a água, dissolvem-se migrando até à superfície onde cristalizam sob a forma de fluorescências (cristalização à superfície) ou de criptoefluorescências (cristalização sob o revestimento da parede). Quando os sais se dissolvem com uma humidade relativa acima dos 65% e cristalizam quando a humidade relativa baixa, chamam-se sais higroscópicos.

Mesmo quando a humidade desaparece, os sais continuam presentes provocando assim o humedecimento das paredes causando degradações. Estas anomalias são caracterizadas por manchas em locais de concentração de sais e pela degradação de revestimentos de paredes (figura 2.14) [15].



Fig. 2.14 – Pormenor da formação de efflorescências sobre tijolo-à-vista [15]

2.4.2.4. Humidade de condensação

As condensações nos elementos de construção são a causa mais comum da humidade nos edifícios. A quantidade máxima de vapor de água que o ar pode conter sem condensar designa-se por limite de saturação e este limite aumenta com a temperatura. Quando a temperatura exterior desce e as perdas térmicas através das paredes são grandes, a temperatura desce abaixo da temperatura de saturação, provocando condensações.

A produção de vapor é causada por toda a atividade humana desde a respiração até à confeção de alimentos. Assim, é necessário garantir isolamento térmico para que o coeficiente de transmissão térmico seja baixo impedindo que a temperatura superficial interior não desça abaixo da temperatura de saturação.

Relativamente ao abaixamento da temperatura, as novas construções já estão dotadas de um bom isolamento térmico que permite que a temperatura superficial interior não desça abaixo da temperatura de saturação provocando o aparecimento de condensações. O maior problema encontra-se nas zonas de menor isolamento térmico chamadas de “pontes térmicas” característica de paredes em zonas de pilares não protegidos (figura 2.15).

Para evitar as condensações poder-se-á analisar a equação 2.1 que permite conhecer a influência que cada parâmetro acarreta

$$\theta_i = t_i - \frac{1}{h_i} \times U(t_i - t_e) \quad (2.1)$$

em que:

θ_i : Temperatura do paramento interior (°C)

t_i, t_e : Temperaturas do ar, interior e exterior (°C)

$\frac{1}{h_i}$: Resistência térmica superficial interior (m²°C/W)

U : Coeficiente de transmissão térmica (W/m²°C)

Daqui se conclui que, para aumentar o θ_i e consequentemente evitar as condensações, podem ser tomadas as medidas:

- Diminuir U, aumentando o isolamento térmico;
- Aumentar a temperatura ambiente.

Para diminuir a humidade relativa é também vantajoso ventilar a área.

Quando não ocorrem condensações superficiais, se o ar que circula passar por algum ponto da envolvente em que a pressão parcial do vapor de água iguale a pressão de saturação, irão ocorrer o que se designa por “condensações internas”.

Esta patologia é caracterizada pelo aparecimento de manchas de humidade e bolores na superfície interior das paredes (figura 2.16). As zonas mais afetadas são as paredes exteriores e os compartimentos sanitários [15].



Fig. 2.15 – Condensações em zonas de pontes térmicas [15]

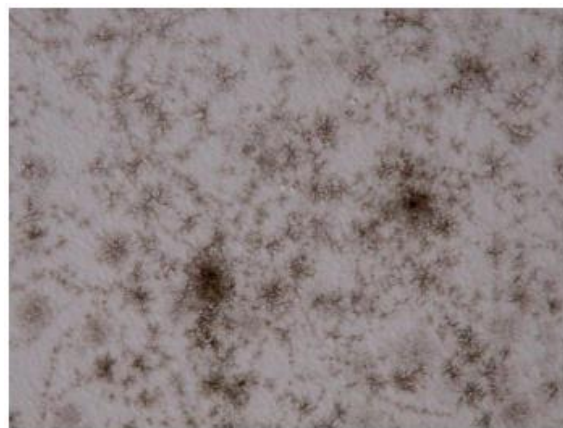


Fig. 2.16 – Aspeto de pormenor de fungos e bolores instalados em paramento, por efeito da condensação superficial [15]

2.4.2.5. Humidade devido a causas fortuitas

A humidade devido a causas fortuitas pode dever-se a acidentes pontuais ou à falta de manutenção. Correspondem normalmente a um mau funcionamento do equipamento ou a um defeito na construção sendo típica uma fuga na canalização.

A identificação da origem da humidade nem sempre é simples. Normalmente as manifestações dão-se num local longe da fonte uma vez que a água migra no interior dos elementos [15].

2.4.2.6. Humidade ascensional

Os materiais, quando em contacto com água e, essencialmente, em contacto com um solo húmido, ficam sujeitos à ascensão capilar. A ascensão da água pode atingir várias alturas dependendo de fatores como a porosidade dos materiais, da espessura e orientação das paredes, e, claro, da quantidade de água em contacto. A altura máxima atingida pela frente húmida ocorre quando a água evaporada pela superfície da parede atinge o equilíbrio com a água absorvida pelo solo sendo portanto importante que a parede não se encontre revestidas com materiais impermeabilizantes o que iria contribuir para que a frente húmida aumentasse (figura 2.17) [15].



Fig. 2.17 – Parede sujeita a fenómeno de humidade ascensional agravado pela impermeabilização parcial da face interior [15].

A água pode ter origem em águas freáticas (atinge as paredes interiores e as manchas de humidade são constantes ao longo do ano) ou em águas superficiais (os danos dão-se maioritariamente nas paredes exteriores e as manchas variam ao longo do ano aumentando no período húmido). O contacto com a água dá origem à ascensão e pode ocorrer tanto na fase de construção como de utilização. Manifesta-se sob a forma de manchas de humidade nas zonas das paredes junto ao solo podendo também apresentar eflorescências, criptoflorescências e manchas de bolor [15].

2.5. SISTEMA DE VENTILAÇÃO DA BASE DAS PAREDES - HUMIVENT

2.5.1. CAPILARIDADE VS INUNDAÇÃO

Foi já mencionado que existem diversas formas de manifestação de humidade tornando-se necessário destacar a humidade ascensional. Existem vários estudos que caracterizam e analisam este problema e o que se pretende com este trabalho é perceber se as soluções adotadas podem ser igualmente aplicadas na sequência de uma inundação.

Segundo A. S. Guimarães [14] a capilaridade ocorre quando um material poroso é posto em contacto com água na sua fase líquida. Este fenómeno pode ser identificado na figura 2.18.

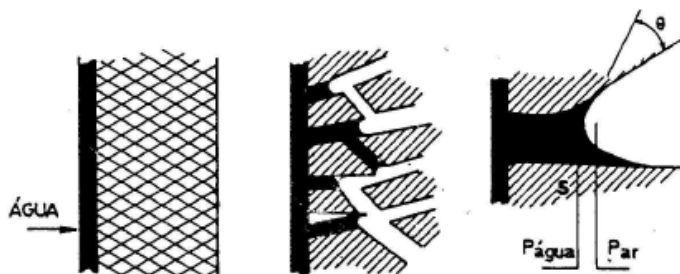


Fig. 2.18 – O fenómeno da capilaridade [16]

A água em fase líquida está presente no solo através das águas freáticas ou das águas superficiais (ver figura 2.19) e ascende por capilaridade até atingir o pavimento e as paredes do edifício. Como a

maioria dos materiais de construção tradicionais são porosos, a sua capilaridade é elevada provocando degradação e mau desempenho dos elementos.

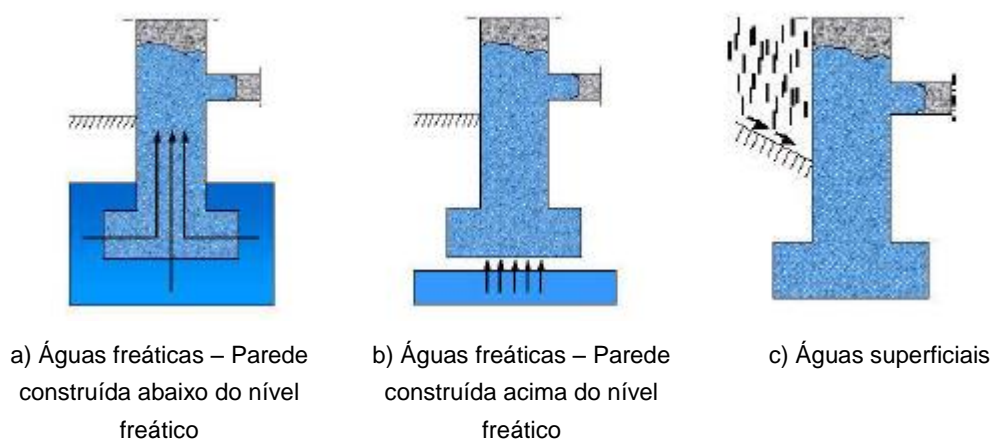


Fig. 2.19 – Humificação por águas freáticas e superficiais [14]

Não havendo fatores que impeçam a migração (como barreiras inibidoras de deslocamento) da água ou mesmo havendo condições propícias para que isso aconteça (telas impermeabilizantes que não permitem a evaporação), a água, em contacto com o solo, ascende. A altura desta ascensão pode variar dependendo de vários fatores como:

- Quantidade de água em contacto com o solo;
- Condições de evaporação mais ou menos favoráveis. Quando a quantidade de água absorvida é a mesma que a evaporada, a altura da humidade atinge o equilíbrio. Assim, quanto menos permeável ao vapor é o revestimento utilizado (como por exemplo o azulejo), mais elevado é o nível atingido pela frente húmida [14][14];
- Espessura da parede. Estudos de simulação efetuados permitem verificar que quanto maior é a espessura da parede maior é a altura atingida pela frente húmida uma vez que a quantidade de absorção também é maior;
- Porosidade dos materiais. A porosidade dos materiais pode ser classificada como aberta ou fechada sendo esta última a situação mais difícil de encontrar. Nos materiais com porosidade aberta os vazios comunicam entre si permitindo a circulação de fluidos no seu interior. A comunicação entre os poros e o material torna o material mais vulnerável e permeável. Esta situação não é a desejada mas é a mais comum nos elementos construtivos;
- A presença de sais. Quando a humidade relativa do ar aumenta os sais dissolvem-se e quando a humidade relativa diminui os sais cristalizam gerando a degradação dos materiais. Estes sais encontram-se presentes nos materiais de construção ou são transportados através do solo. Entre os estragos, refira-se a fendilhação, a perda de coesão e a formação de vazios, tudo meios de comunicação para uma maior propagação da água [14].

2.5.2. EVOLUÇÃO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO

Com o intuito de acelerar o processo de secagem das paredes surge um conceito que se baseia na introdução de um sistema de ventilação na base das mesmas. Este sistema pode ser constituído por canais ventilados naturalmente ou associado a um dispositivo de ventilação mecânico higro-regulável [14].

Esta solução foi já testada para a secagem das paredes com patologias associadas à humidade ascensional e teve resultados significativos na redução do nível atingido pela frente de água. Nesta situação, o sistema foi instalado acima do nível da água e foram testadas várias soluções até se encontrar aquela que permitia obter melhores resultados. Esta técnica tem demonstrado a sua utilidade no que diz respeito aos edifícios antigos e ao património monumental [14]. Figura 2.20.

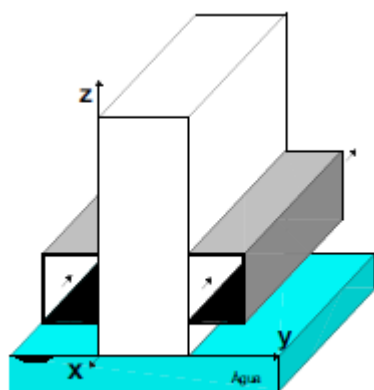


Fig. 2.20 – a) Sistema instalado acima do nível freático [14]

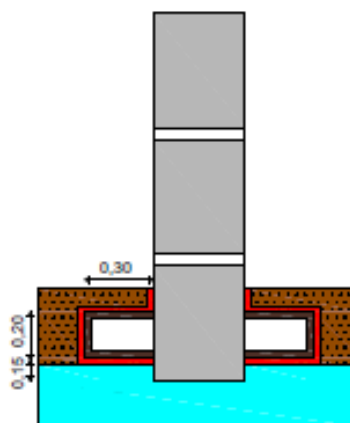


Fig. 2.20 – b) Otimização do sistema [14]

O Laboratório de Física das Construções – LFC – da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP – desenvolveu durante anos estes estudos e já contribuiu para avanços significativos na resolução deste problema.

Inicialmente surgiu a ideia de se ventilar a base das paredes de uma forma natural. Este conceito foi rapidamente adaptado e passou a ser desenvolvido através de um processo mecânico controlado. Para comprovar que se tratava de uma bom investimento, foram realizados estudos de simulação numérica com e sem o sistema [14].

Em 2002 o sistema foi aplicado em alguns edifícios em Portugal e, em 2005, efetuaram-se ensaios laboratoriais para caracterização e avaliação de parâmetros como a sua geometria e a velocidade de circulação do ar [17].

Em 2007 verificou-se que, de facto, o sistema de ventilação mecânico consegue reduzir a altura de água presente na parede contudo, esta solução teve consequências como o aparecimento de condensações no interior do sistema. Para evitar esta situação, optou-se por se utilizar um sistema higro-regulável onde há uma definição do funcionamento de forma a evitar a ocorrência de condensações interiores ao sistema. [17].

Em 2008 deu-se início a uma tese de Doutoramento [17] com o intuito de criar uma metodologia de dimensionamento do sistema. Agora, para além de se querer reduzir a frente húmida, também tem de ser ter em consideração a ocorrência de condensações e cristalizações.

Para o efeito, comparou-se a solução estudada e otimizada com propostas com a mesma base de funcionamento. Os sistemas idênticos encontrados não apresentavam todos os requisitos pretendidos, apenas drenavam a base das paredes ou removiam fumos e gases do interior do edifício/recinto [17].

Assim surge a conclusão de que se está perante uma tecnologia inovadora procedendo-se ao registo da patente – Patente Portuguesa da Universidade do Porto – UPIN, com o nome de ‘‘Sistema Hígro-Regulável de Ventilação da Base das Paredes para o tratamento da Humidade Ascensional – HUMIVENT’’, tendo sido requerida uma extensão Internacional [17].

2.5.3. HUMIVENT

O controlo do nível atingido pela frente húmida passa por ventilar a base das paredes através de canais instalados na sua base. O mecanismo de transporte de humidade é o ar e é controlado pelo dispositivo HUMIVENT. Este dispositivo foi desenvolvido pelo Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LFC/FEUP) [18].

Este sistema de ventilação é composto por um ventilador (cuja velocidade pode variar) e é ativado por um conjunto de sondas de temperatura e humidade relativa que transmitem a informação ao ventilador em função das condições higrotérmicas do ar à entrada e à saída [18].

Procura-se aumentar a evaporação através da execução de canais ventilados. A instalação destes canais de ventilação é feita ao longo da parede e o comprimento da tubagem pode ser definido conforme o efeito pretendido. A profundidade a que devem ser colocados os canais tem de ser avaliada pelas exigências de estabilidade estrutural.

Deste modo, para proceder ao seu dimensionamento é necessário ter um conhecimento prévio das características da parede, da geometria do sistema de ventilação e, claro, do edifício a tratar uma vez que todos os casos são diferentes. Para cada período de tempo as condições do ambiente exterior/interior são diferentes, assim como para cada configuração do sistema de ventilação terão de se adaptar as características do canal.

Esta técnica inovadora de ventilação veio aumentar a eficiência e acelerar o processo de secagem da parede. Até a uma certa altura o sistema permite diminuir o nível de frente húmida e, a partir daí, a parte superior da parede seca por processos naturais [17].

Este sistema surgiu como necessidade de proteger o património português. Com um acrescido valor histórico e cultural tornou-se necessário ‘‘defender’’ estes edifícios contra os fenómenos naturais. O dispositivo HUMIVENT poderá não ser utilizado apenas para a humidade ascensional mas também para controlar e tratar a humidade provocada por uma inundação [19].

A técnica usada para tratar a humidade por ascensão capilar poderá ser a mesma para secar uma parede na sequência de uma inundação. É feita a circulação do ar na base da parede através de canais em contacto com a mesma como forma de prevenção de infiltrações laterais e aumento de evaporação. Assim se pode reduzir o teor de humidade da parede [19].

Até agora foram feitas experiências no sentido de encontrar sistemas de ventilação que permitissem o tratamento da humidade ascensional. O que se pretende agora é analisar a secagem a partir da base da parede mas na sequência de uma inundação. Na figura 2.21 apresentam-se os casos que caracterizam a parede húmida devido à humidade ascensional e a parede saturada devido a uma inundação.

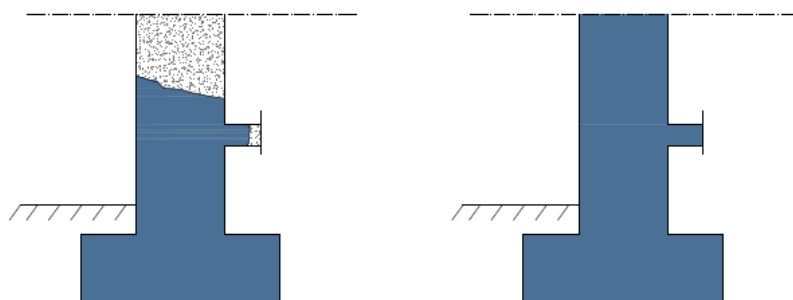


Fig. 2.21 – Humidificação por humidade ascensional e inundação

Ter-se-á de repetir o processo mas agora para a situação inversa: em vez de a água ser absorvida por capilaridade, a parede ficará saturada devido a uma inundação. Pretende-se descobrir quais são as variantes que influenciam a sua absorção, quais os benefícios do sistema de ventilação, se é útil ou não para o caso e qual é a melhor solução (figura 2.22).

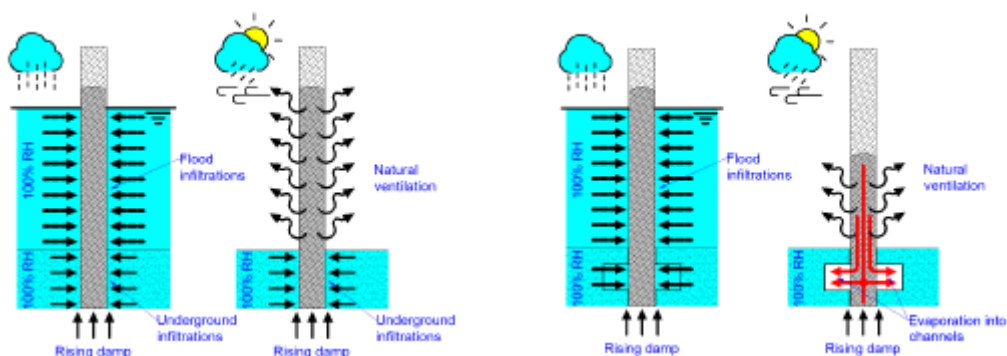


Fig. 2.22 – Princípio do sistema de ventilação para a secagem de edifícios após uma inundação [19]

Nesta situação, a água encontra-se presente em toda a parede portanto já não se poderá aplicar um princípio onde o sistema é instalado acima do nível freático. Terá de se impermeabilizar o sistema para que a água não penetre para dentro do canal, afetando o processo de secagem e inviabilizando a sua eficiência.

Terão de ser analisadas várias variantes até encontrar a melhor solução.

2.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Existe uma diferença conceptual entre cheia: consiste no transbordo de um curso de água relativamente ao seu leito e inundação: consiste na submersão de uma área usualmente emersa. Em ambos os casos trata-se de um fenómeno hidrológico de frequência variável, natural ou induzido pela ação humana.

O histórico de cheias em Portugal permite mostrar que este fenómeno é frequente e que, com uma maior ou menor gravidade, tem vindo a aumentar ao longo dos anos. No futuro, segundo estudos realizados, as cheias tendem a agravar-se essencialmente devido ao aquecimento global.

As consequências daqui resultantes podem ser prejudiciais para o património nacional deixando-o vulnerável. A proximidade das linhas de águas a estes edifícios promove uma maior exposição e, portanto, maior suscetibilidade.

A presença de água nos edifícios pode-se manifestar de várias formas com diferentes consequências. Os problemas que daí possam surgir poderão ser mais ou menos graves dependendo das condições de evaporação, espessura, porosidade dos materiais e presença de sais.

Uma das técnicas que poderá prevenir e controlar a humidade capilar nas paredes passa por instalar um sistema de ventilação na sua base. Já foi desenvolvido no Laboratório de Física das Construções – LFC – da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP – o dispositivo HUMIVENT que permite efetuar a secagem da parede através de um sistema higo-regulável. A técnica foi desencadeada para o tratamento da humidade ascensional e será agora analisada para a secagem de paredes na sequência de uma inundação.

3

PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO WUFI 2D

3.1. INTRODUÇÃO

A análise do estado da humidade na construção tem suscitado muitas questões desde o início do século XX e, nas últimas décadas, tem merecido particular destaque no sentido de encontrar uma solução para o problema. Para proceder ao estudo de patologias que têm como origem a humidade têm vindo a ser introduzidos programas de cálculo automáticos que visam uma análise mais ampla da questão, rápida e eficaz [20].

A introdução de programas de cálculo automático vem contribuir para uma melhor análise dos estudos de uma maneira geral. A partir destes é possível efetuar várias simulações onde se analisam as muitas variáveis e, neste caso, as condições higrotérmicas.

Os modelos utilizados permitem efetuar a combinação de várias propriedades ou de um componente isolado, permitem fixar um parâmetro e variar outro, permitem analisar numa ou em várias direções. A simulação permite testar um maior número de situações num curto espaço de tempo e com muito baixo custo quando em comparação com estudos experimentais em laboratório. Contudo, como se trata de uma simulação haverá que ter consciência se tratar de uma aproximação das condições reais e não necessariamente a realidade.

Neste capítulo será abordado um programa de cálculo automático específico, WUFI 2D versão 3.3, já testado anteriormente em versões mais antigas, que será a ferramenta utilizada para simular a secagem de uma parede na sequência de uma inundação. Serão analisados diversos fatores e serão alterados alguns parâmetros até ser possível concluir a influência de cada um tentando sempre fazer uma aproximação à realidade.

3.2. PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO WUFI 2D 3.3

De entre os vários modelos disponíveis, decidiu-se utilizar o programa WUFI 2D versão 3.3 não só por permitir obter resultados que se adequam ao estudo mas também por já ter sido utilizado em trabalhos relacionados com o problema da humidade ascensional, situação inversa da aqui analisada.

Este programa, desenvolvido no “FraunhoferInstitut für Bauphysik” em Holzkirchen, Alemanha está disponível no LFC – Laboratório de Física das Construções – na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP – facilitando o seu acesso e utilização. É um programa com várias ferramentas podendo ser um meio de trabalho para um vasto conjunto de profissionais (alunos, professores, engenheiros, arquitetos...) [21].

O WUFI 2D permite uma análise bidimensional da transferência de calor e humidade nos materiais de construção baseada no método dos volumes-finitos, permitindo a modelação de elementos de construção com geometrias complexas [20], [21].

Este programa tem como base um sistema de equações não lineares de transferência de calor e humidade com dependência mútua dos parâmetros. Se por um lado a entalpia total, a condutibilidade térmica e o calor gerado no interior do elemento dependem do teor de humidade, por outro lado, os fluxos de humidade dependem da temperatura. Estas podem ser resolvidas em conjunto em função da temperatura e da humidade relativa [20]. Apresentam-se as equações 3.1 e 3.2

$$\frac{dH}{dT} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + h_v \nabla(\delta_p \nabla(\phi p_{sat})) \quad (3.1)$$

$$\frac{dw}{d\phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla(D_\phi \nabla \phi + \delta_p \nabla(\phi p_{sat})) \quad (3.2)$$

em que:

$\frac{dH}{dT}$: Capacidade de armazenamento de calor do material húmido (J/(m³.K))

$\frac{dw}{d\phi}$: Capacidade de armazenamento de humidade do material húmido (kg/m³)

λ : Condutibilidade térmica do material húmido (W/(m.K))

h_v : Entalpia de evaporação da água (J/kg)

D_ϕ : Coeficiente de condução líquida (kg/(m.s))

δ_p : Permeabilidade ao vapor de água do material (kg/(m.s.Pa))

T : Temperatura (°C)

w : Teor de humidade do material (kg/m³)

ϕ : Humidade relativa (-)

p_{sat} : Pressão de saturação do vapor de água (Pa)

3.3. FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA APLICADO AO CENÁRIO DE SIMULAÇÃO

3.3.1. DESCRIÇÃO

O programa permite obter resultados do elemento de construção em estudo como o teor de humidade, a humidade relativa e a temperatura. Estes resultados podem ser visualizados em 2D e são obtidos para o período de tempo escolhido.

Através da janela principal do programa pode-se aceder aos vários menus (figura 3.1 e 3.2).

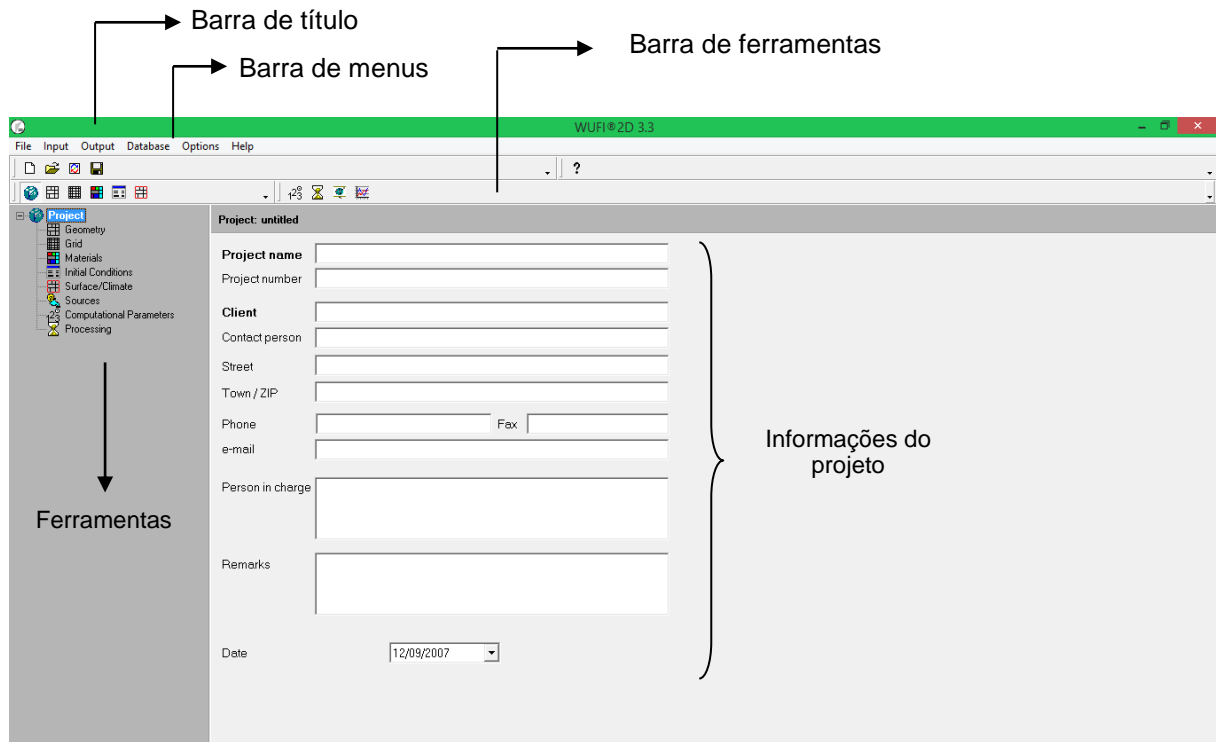


Fig. 3.1 – Ecrã principal

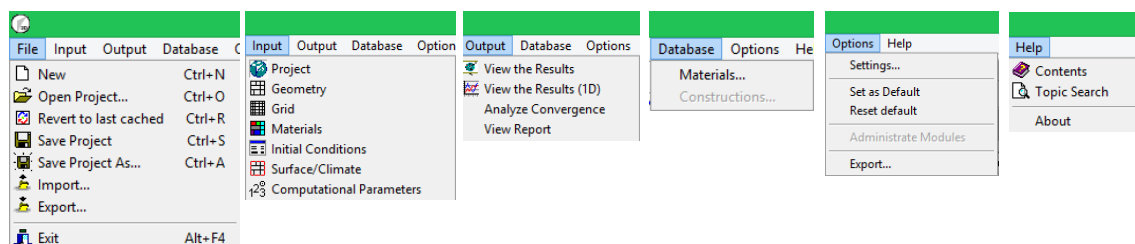


Fig. 3.2 – Barra de menus

Irá ser mostrado um exemplo de uma simulação para apresentar os passos que devem ser seguidos no WUFI 2D.

3.3.2. INFORMAÇÃO DO PROJETO

Neste campo podem ser inseridas as informações do projeto como:

- Nome do projeto (1)
- Número do projeto (2)
- Informações do cliente (3)
- Data do projeto (4)

São campos meramente informativos e que em nada afetam a simulação. Figura 3.3.

The screenshot shows the WUFI 2D 3.3 software interface. On the left is a tree view with categories: Project, Geometry, Grid, Materials, Initial Conditions, Surface/Climate, Sources, Computational Parameters, and Processing. The main window displays the 'Project: untitled' dialog box. It contains the following fields:

- Project name:** A text box containing the number '1'.
- Project number:** A text box containing the number '2'.
- Client:** A group of fields including 'Contact person', 'Street', 'Town / ZIP', 'Phone', 'Fax', 'e-mail', and 'Person in charge'. These fields are grouped by a bracket and labeled with the number '3'.
- Remarks:** A large text area.
- Date:** A date picker showing '12/09/2007', labeled with the number '4'.

Fig. 3.3 – Caixa de diálogo “Informação do projeto”

3.3.3. GEOMETRIA

No campo da geometria é possível definir as dimensões do elemento construtivo. Neste caso pretende-se simular uma parede com 20 cm de espessura. Desenha-se a figura e, ajustando os eixos de referência (x e y) inserem-se as dimensões pretendidas. Na base da parede foi inserida areia considerando-se tratar do material o terreno envolvente. Sendo a areia muito absorvente considera-se tratar de uma situação menos favorável. O terreno foi revestido com uma membrana de forma a impermeabilizá-lo (figura 3.4).

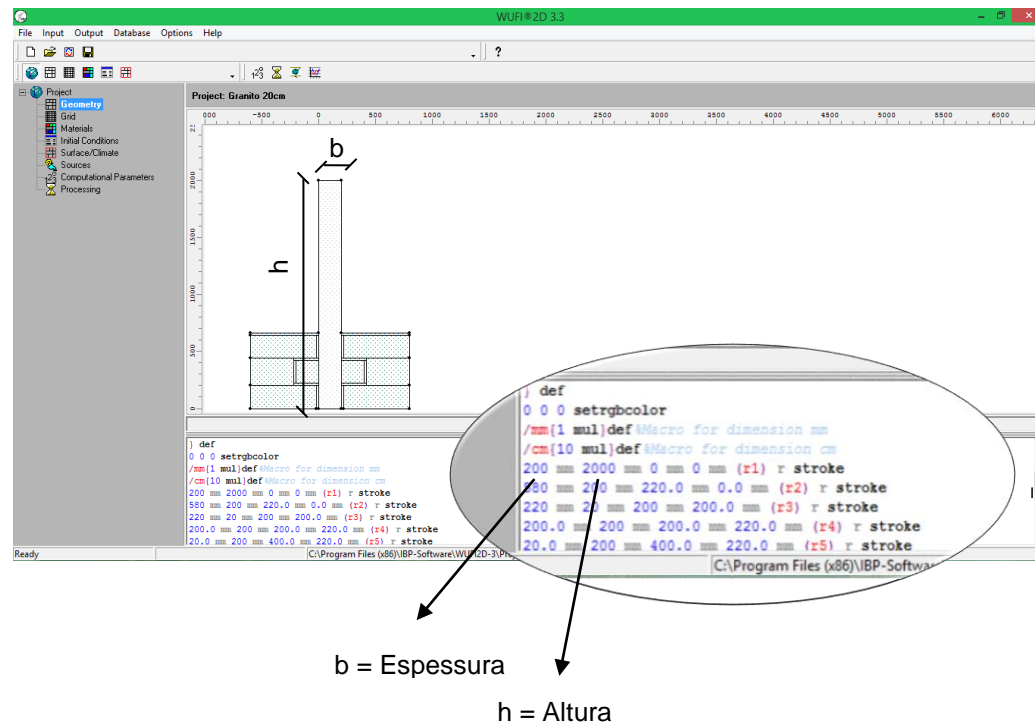


Fig. 3.4 – Caixa de diálogo “Geometria”

3.3.4. GRELHA

Em “Grid” pode ser definido o número mínimo e máximo dos elementos em cada direção e, a partir daí, é gerada a grelha automaticamente. Dependendo do detalhe que se quer ter no elemento, ter-se-á de efetuar um reajuste à malha definida. Na figura 3.5 representam-se malhas com detalhes distintos.

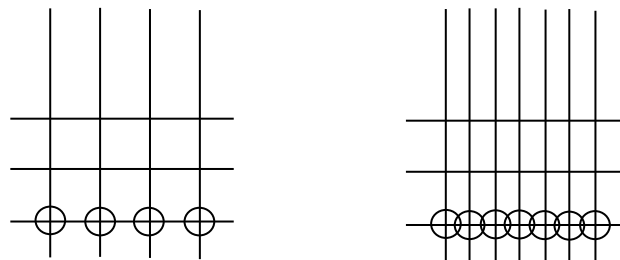


Fig. 3.5 – Conceito de malha

A parede é avaliada em cada “nó”, no cruzamento de cada direção, pelo que se percebe que quanto menor for a malha maior será a precisão e definição dos resultados. Foram testadas várias soluções até encontrar a situação intermédia que apresenta o detalhe necessário. Para a secagem da parede, adotam-se os valores de:

- 100 na direção X
- 120 na direção y

apresentados na figura 3.6.

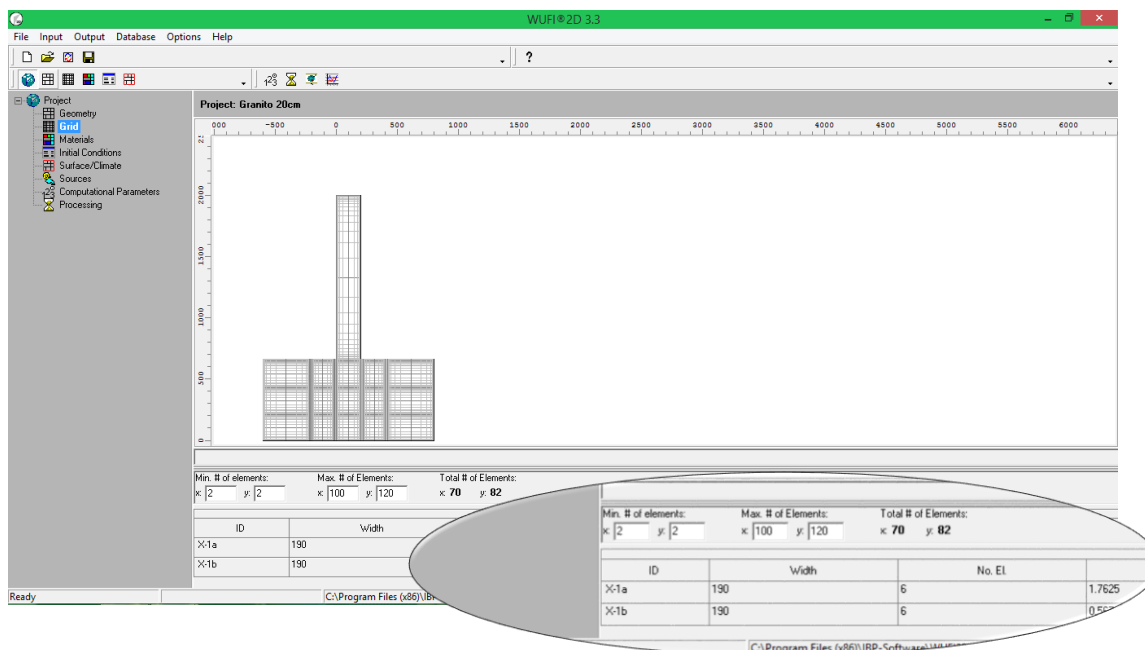


Fig. 3.6 – Grelha escolhida para a simulação

3.3.5. MATERIAIS

Relativamente aos materiais escolhidos para as simulações efetuadas, existem duas situações possíveis: atribuir um material já existente na base de dados ou criar um novo material com as propriedades que se pretende.

Em ambos os casos, os materiais são caracterizados através de um conjunto de propriedades fundamentais definidas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Dados de entrada – Propriedades dos materiais

Massa volúmica- ρ	kg/m^3
Calor específico - c_p	$\text{J}/(\text{kg.K})$
Porosidade - ϵ	% ou m^3/m^3
Condutibilidade térmica - λ	$\text{W}/(\text{m.K})$
Fator de resistência a difusão de vapor - μ	-
Curva higroscópica $w=f(\phi)$	
Coefficiente de absorção de água - A	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{s})$
Teor de humidade de saturação - w_{sat}	kg/m^3
Teor de humidade para 80% de humidade relativa - w_{80}	kg/m^3
Coefficiente de transporte liquido - $D_w (w_{80}, w_{\text{sat}})$	m^2/s

Para a inserção das curvas higroscópicas de cada material introduz-se apenas a curva de adsorção. Estes valores são apresentados no capítulo 4 tabela 4.4.

3.3.5.1. Material já existente na base de dados

Caso se pretenda utilizar um material já existente na base de dados basta seleccionar o elemento construtivo desenhado à qual abrirá automaticamente uma janela. Figura 3.7.

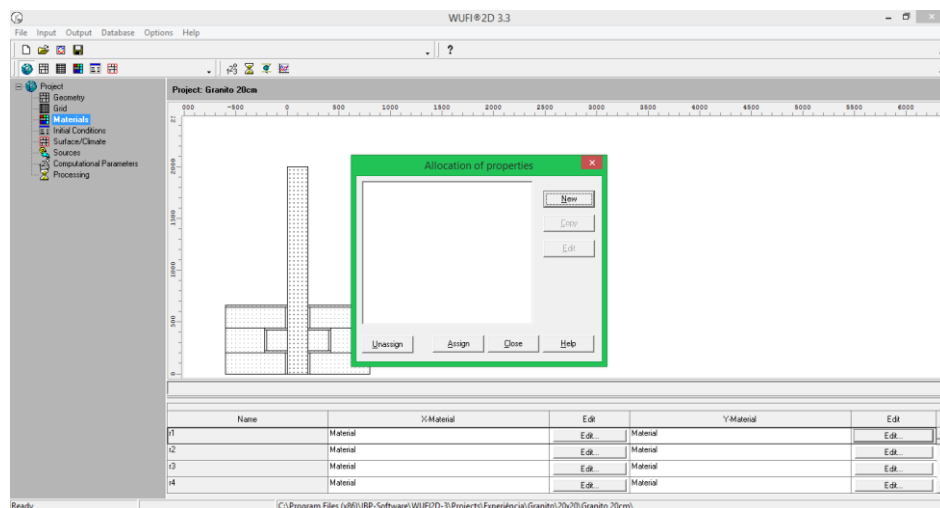


Fig. 3.7 – Caixa de diálogo para seleção de um material

Ao seleccionar ‘new’ abrirá uma nova janela em que, mediante a ‘fonte’ (1) se poderá seleccionar um catálogo (2). É possível seleccionar desde argamassas, betão, tijolo, materiais de isolamento, pedra, entre outros. Figura 3.8.

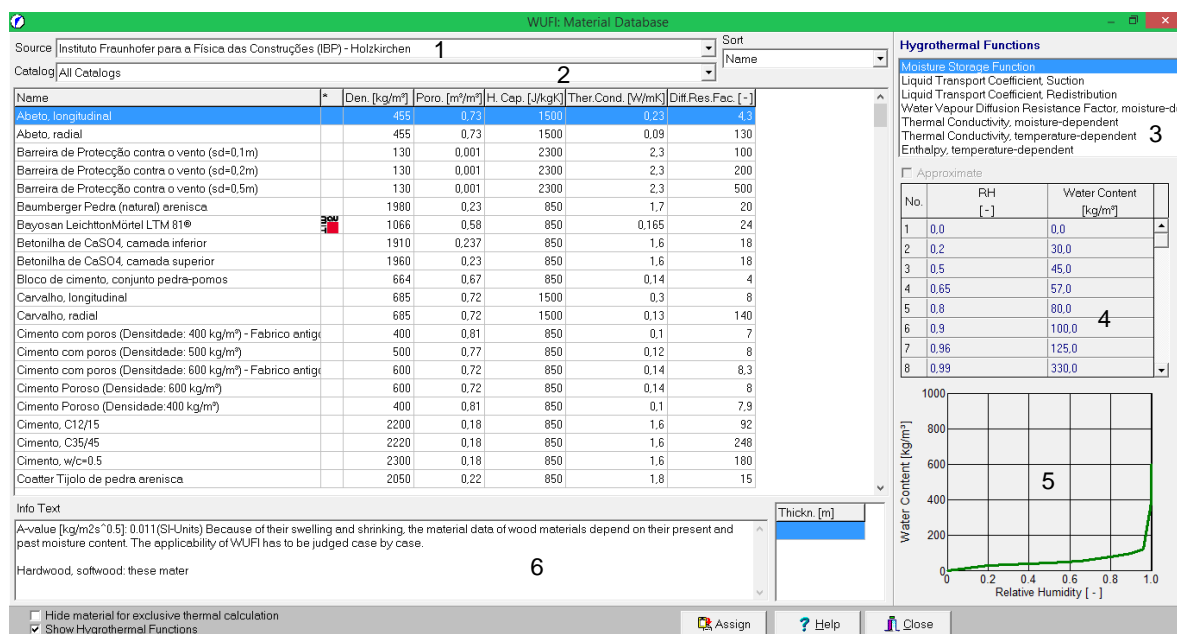


Fig. 3.8 – Caixa de diálogo para escolha do material e respetivas propriedades

Seleciona-se o material pretendido e o programa apresenta as características desse material (3), (4), (5), (6), nomeadamente a curva higroscópica.

Carregando no botão “Assign” (1) o programa assume o material escolhido. O material pode ser editado em “Edit” (2) e, assim que a escolha estiver definida, seleciona-se novamente “Assign”.
Figura 3.9.

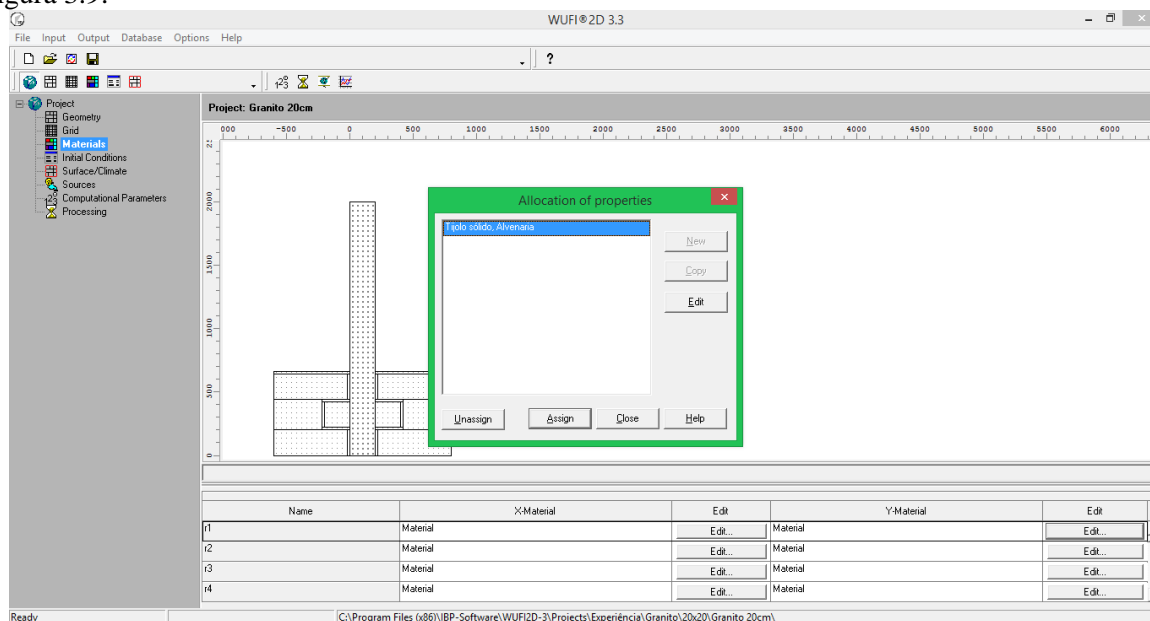


Fig. 3.9 – Caixa de diálogo para a conclusão de escolha do material

O processo repete-se para os outros elementos de construção.

3.3.5.2. Criação de novo material

Para se proceder à criação de um novo material é necessário correr o “WUFI Editor” (figura 3.10 e 3.11).

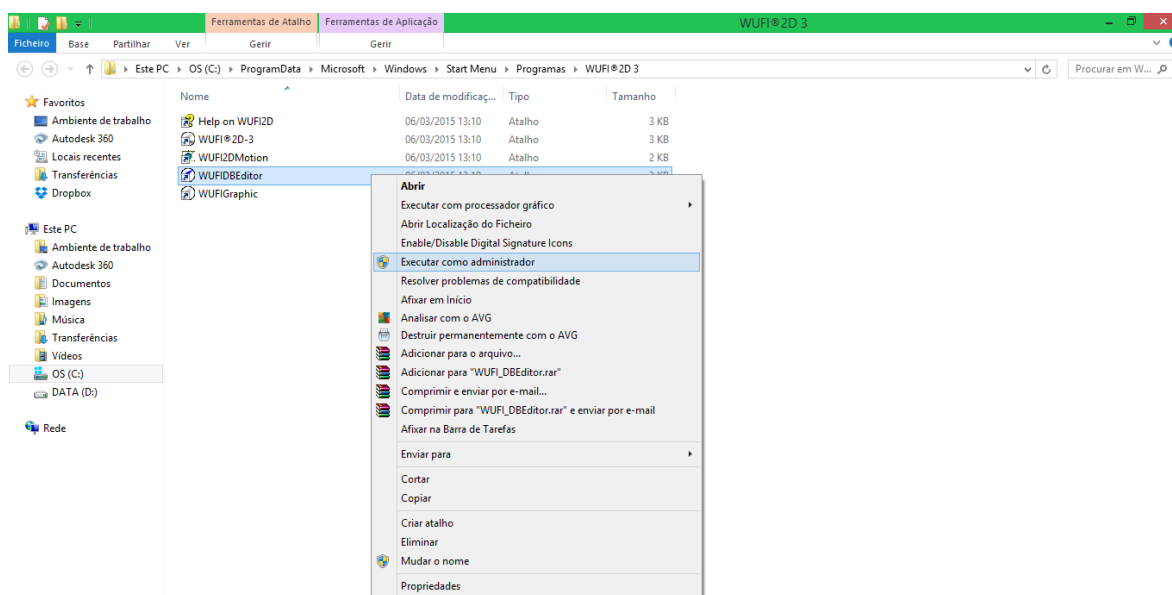


Fig. 3.10 – Método para abrir o WUFI Editor

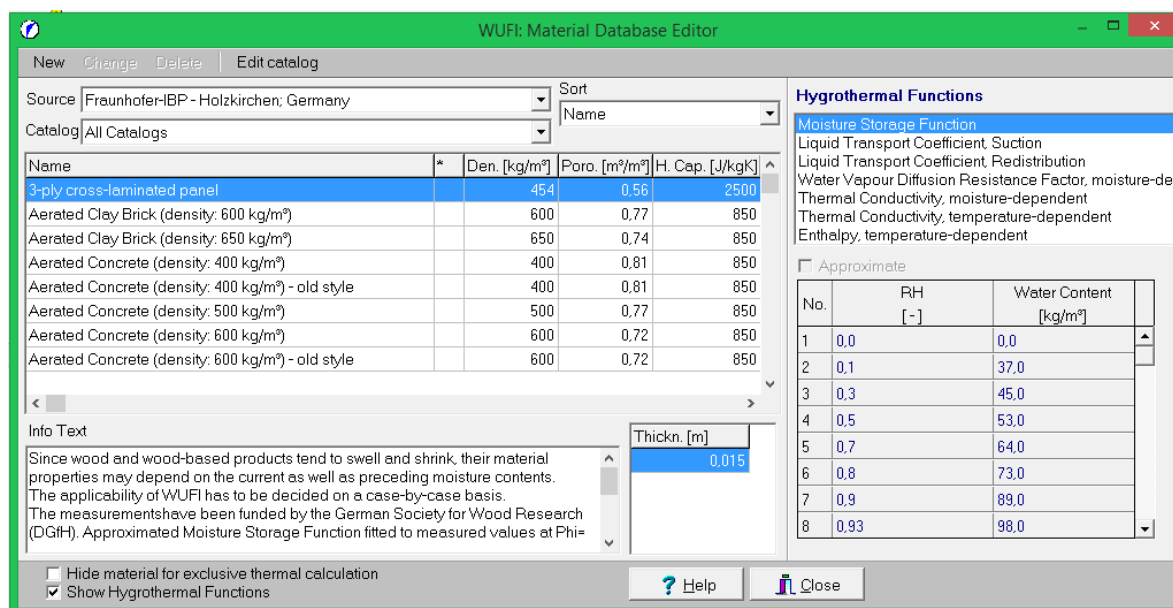


Fig. 3.11 – Caixa de diálogo para a criação de um novo material

Em “Source” (1) escolher a opção “User defined” – definido pelo utilizador – e clicar em “New” (2). Abre uma nova janela em que o utilizador define as propriedades que pretende (3) correspondentes a cada material. Figura 3.12.

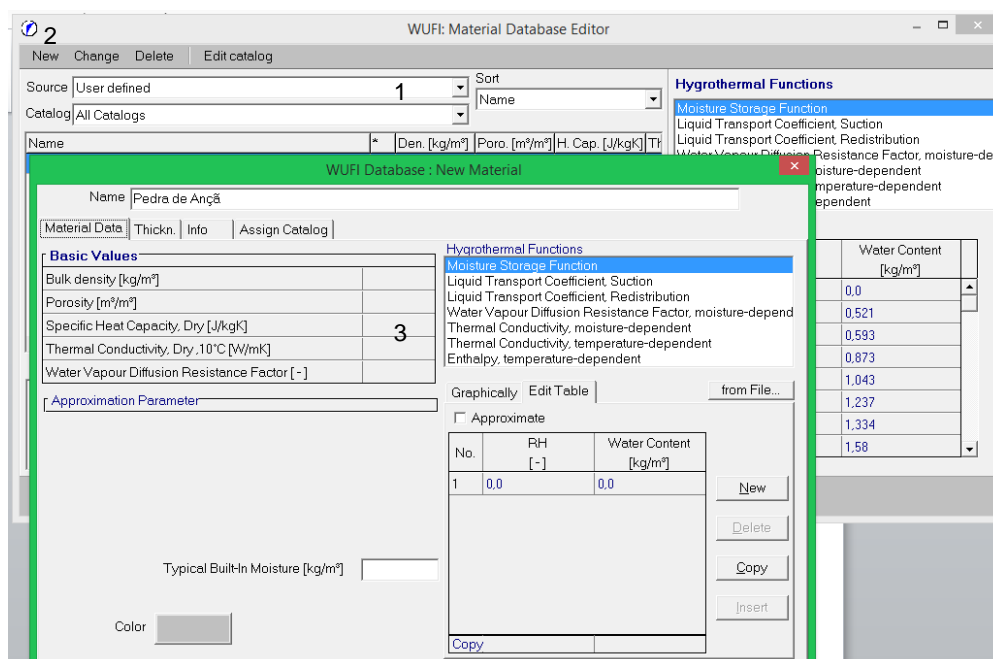


Fig. 3.12 – Caixa de diálogo para a criação de um novo material

Selecione a opção “Liquid Transport Coefficient Function” (1) e escolhendo a opção “Generate” (2) podem ser atribuídas as restantes características (3) ao material que se está a criar. Figura 3.13.

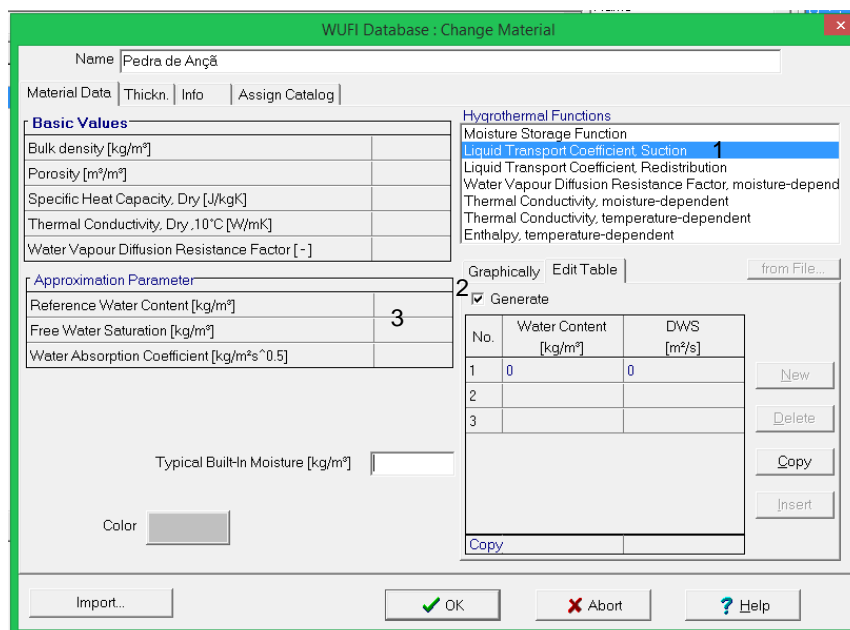


Fig. 3.13 – Caixa de diálogo par a criação de um novo material

3.3.6. CONDIÇÕES INICIAIS

Para definir as condições iniciais definem-se os valores da temperatura (1), 20° C foi o valor considerado neste caso, e da humidade relativa (2) considerada 100% para simular a saturação da parede e 70% para simular o terreno envolvente. O teor de humidade inicial (3) é determinado pelo programa através da curva higroscópica do material em questão, com base no valor de humidade relativa definida (figura 3.14).

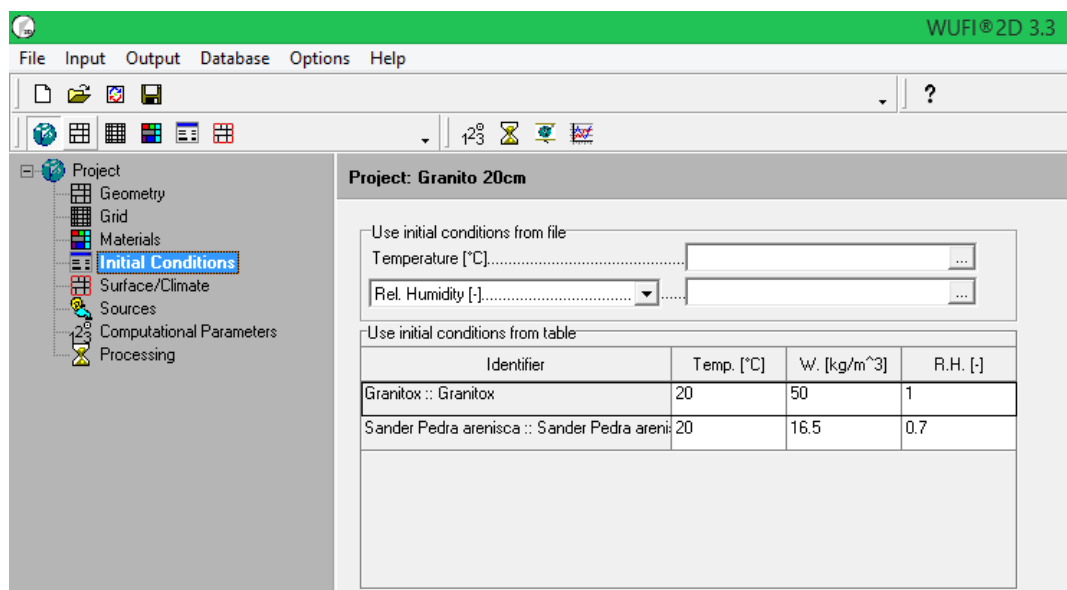


Fig. 3.14 – Condições iniciais

3.3.7. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA NA INTERFACE / CLIMA

Neste campo definem-se as condições de fronteira das interfaces dos elementos de construção em estudo. Clicando em cada uma das interfaces abre uma nova caixa de diálogo que permite inserir novas condições ou editar as já existentes. Clicando em “New” (1) surge uma nova caixa de diálogo que será editável (figura 3.15).

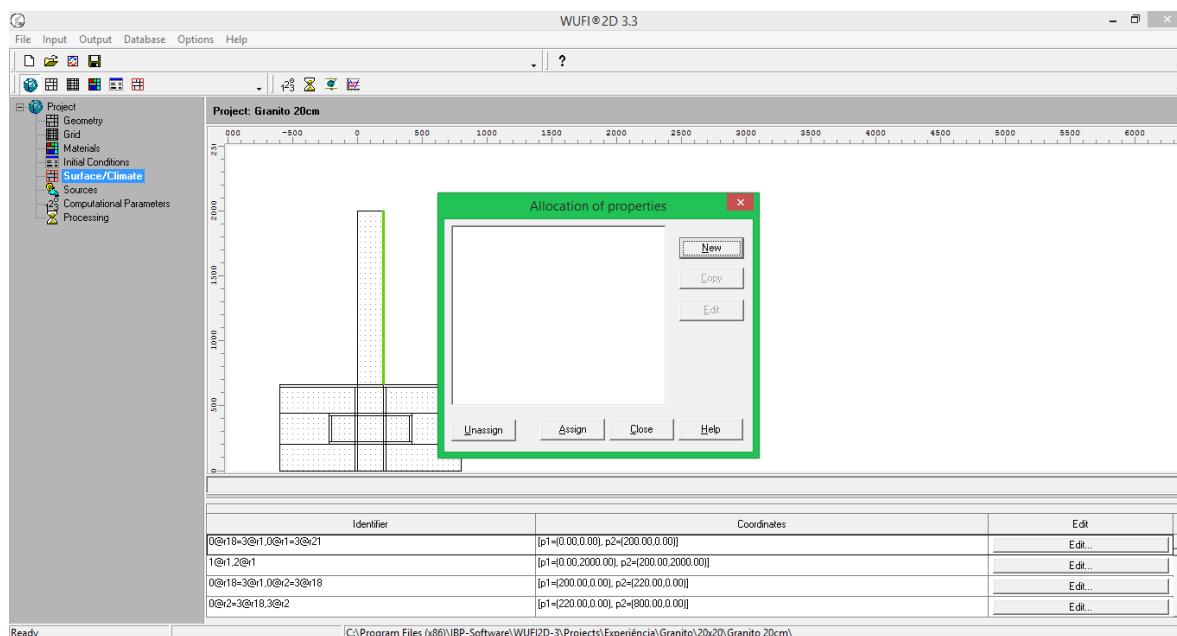


Fig. 3.15 – Condições fronteira na interface

Clicando duas vezes é possível alterar o nome (1) e em “Edit” (2) as propriedades a atribuir. Figura 3.16.

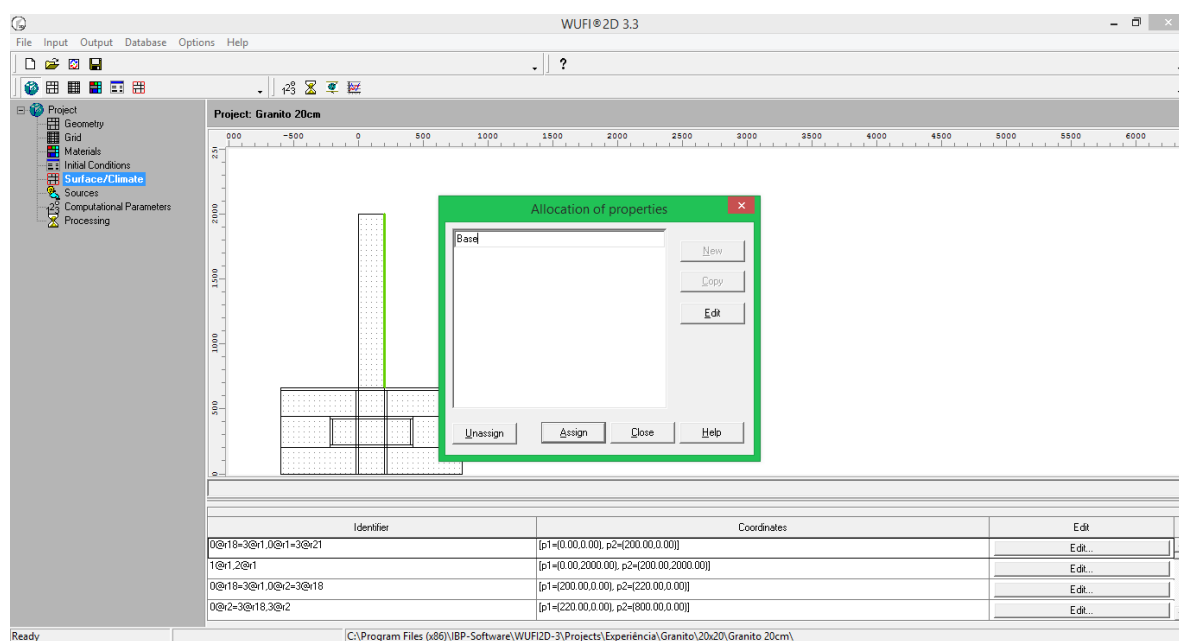


Fig. 3.16 – Condições fronteira na interface

Ao clicar em “Edit” surge uma nova janela onde se selecciona o primeiro separador “Surface Coefficients” para definir algumas propriedades. São definidas algumas características essenciais para que o WUFI 2D funcione corretamente. Deve ser introduzido o coeficiente de transmissão térmico (ver figura 3.17) da parede para que o programa considere existência de troca de calor bem como de humidade. Caso contrário o WUFI 2D comportar-se-ia como se de uma fronteira “adiabática” se tratasse. Contudo, esta opção de considerar a fronteira “adiabática” é também uma condição que pode ser seleccionada (ver figura 3.17), situação escolhida para a interface superior e laterais. Estas fronteiras têm como intuito delimitar o sistema, isolando-o do que se encontra à volta.

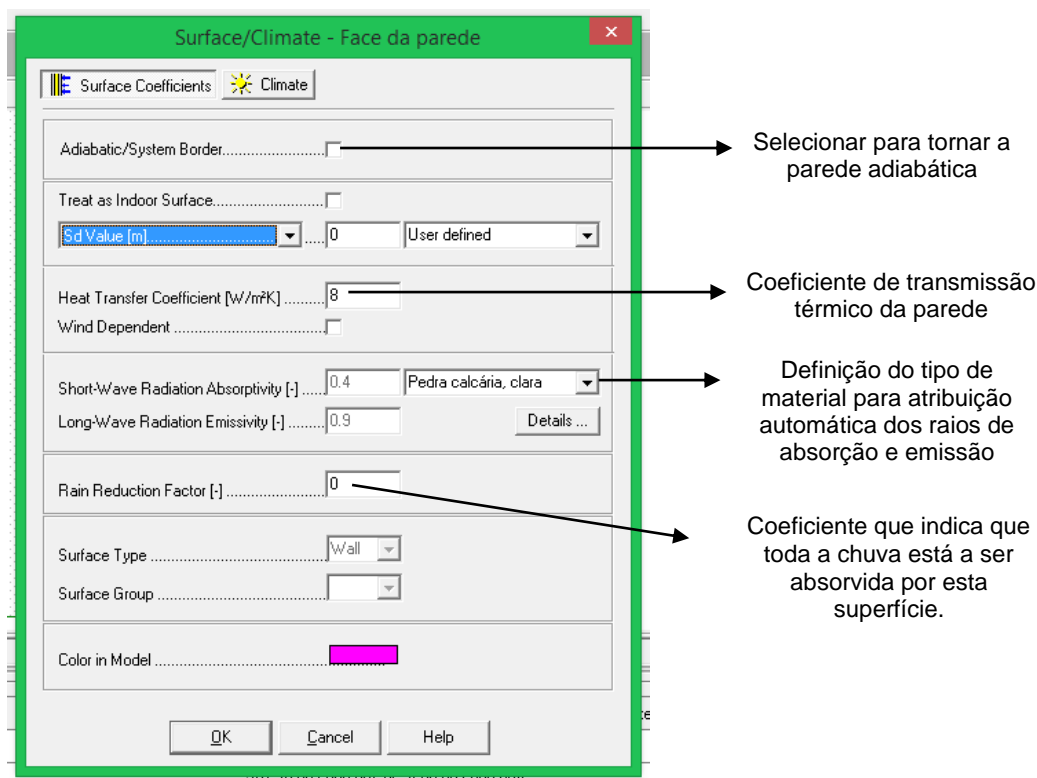


Fig. 3.17 – Secção “Surface Coefficients”

Em “Edit” existe ainda o separador “Climate” onde se definem as condições do clima (situação escolhida para as restantes interfaces). Em “Browse” é possível editar as características obtendo-se o cenário pretendido. Figura 3.18

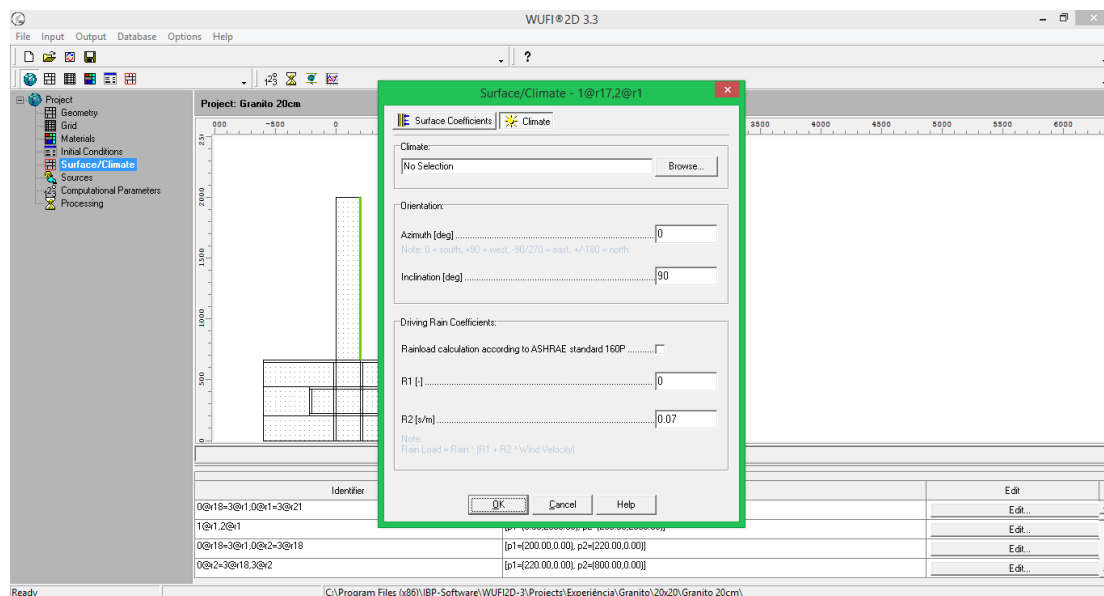


Fig. 3.18 – Secção “Climate”

Em “Map/File” seleciona-se a opção “Browse”. Na nova janela que se abrirá pode-se escolher um clima já existente na base de dados do programa em “Select from Map” ou seleciona-se a opção “Select user defined File” para importar um ficheiro com critérios pré-definidos pelo utilizador (figura 3.19).

Com o intuito do clima não ser um parâmetro determinante no resultado das simulações foram selecionadas as condições climáticas constantes. De outro modo, (como acontece em paredes com contacto com o exterior) os resultados seriam mais difíceis de interpretar uma vez que fatores como a radiação solar e o vento iriam interferir na análise.

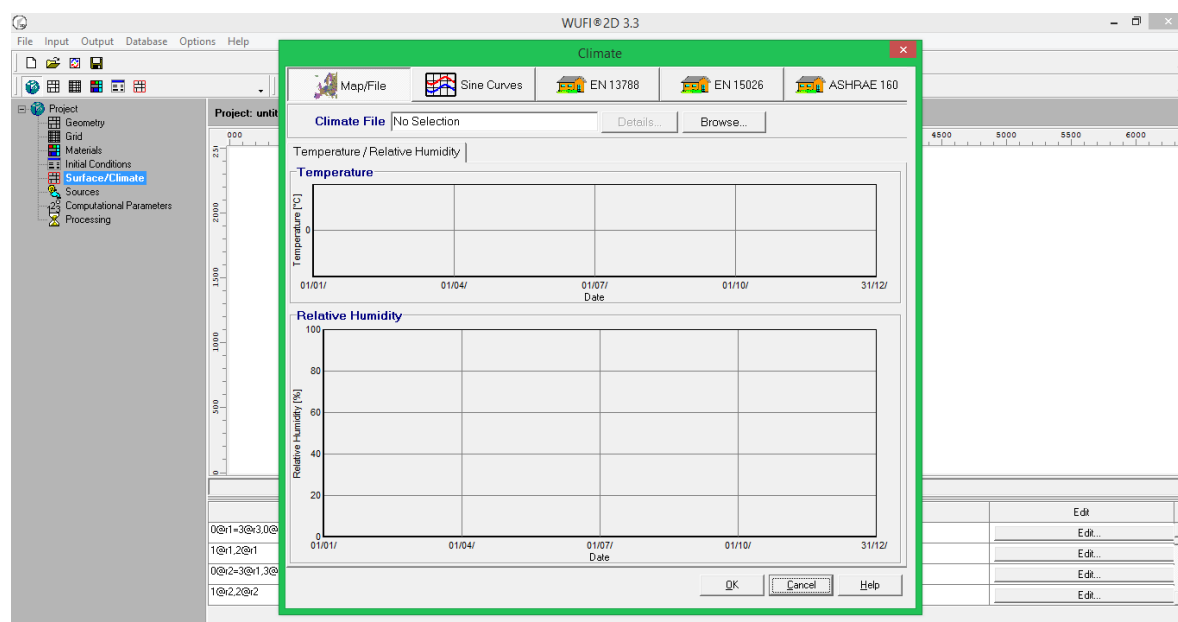


Fig. 3.19 – Definição do clima

Criou-se um ficheiro em formato .kli ou .bac com os parâmetros que se pretendiam inserir. Como tal foram criados dois cenários:

1. Simulação da saturação da base. O WUFI 2D só permite inserir como valor máximo de humidade relativa 100%. Como se queria criar uma condição onde a base se encontrasse super saturada criou-se o ficheiro que se encontra na figura 3.20. São introduzidas 8760 linhas correspondentes a 8760 horas de simulação (um ano) onde são inseridas as propriedades pretendidas.

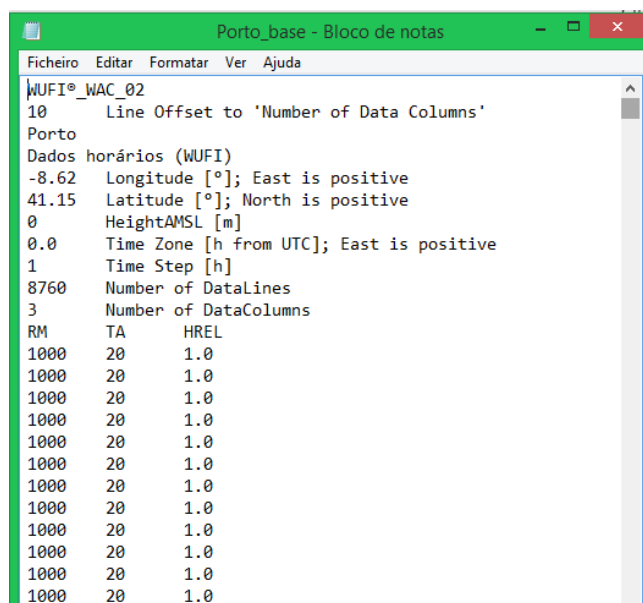


Fig. 3.20 – Ficheiro para simular a saturação da base

2. Simulação das condições climáticas constantes para as restantes interfaces ($T=20^{\circ}\text{C}$ e $HR=60\%$) (figura 3.21). Cria-se um ficheiro com as condições pretendidas onde em apenas uma linha se introduz o número de horas a simular e a temperatura e a humidade relativa a considerar.

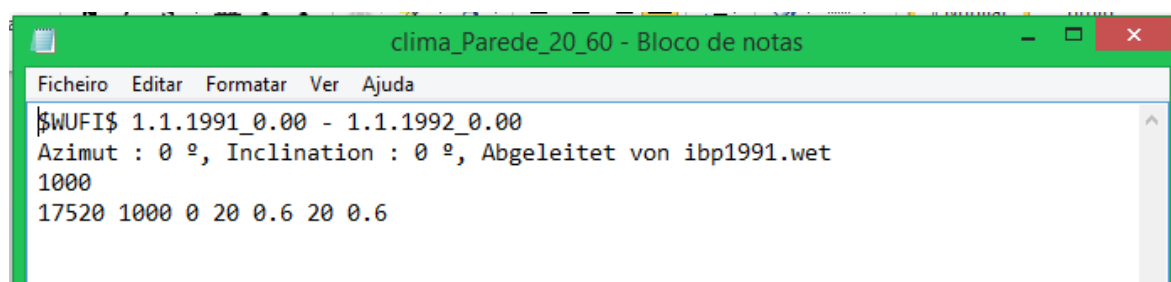


Fig. 3.21 – Ficheiro para simular as restantes interfaces

Na figura 3.22 apresenta-se um resumo das condições definidas para cada interface.

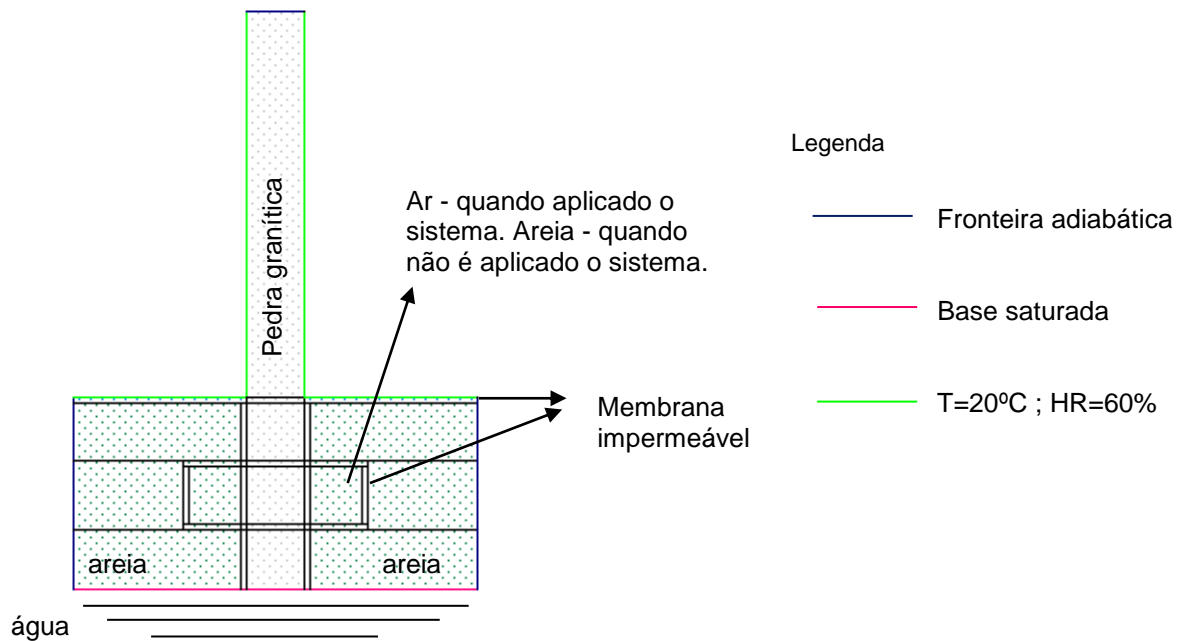


Fig. 3.22 – Condições fronteira definidas

3.3.8. FONTES

A opção “Sources” não se encontra disponível na barra de menus, apenas nas ferramentas. Pode ser inserida uma fonte de calor, uma fonte de humidade ou uma fonte de renovação de ar (figura 3.23).

Para introduzir uma ou mais fontes, é necessário abrir a caixa de propriedades da secção e em “Add” seleccionar a fonte que se pretende (figura 3.23). Para estudar a influência/eficácia de um sistema de ventilação da base das paredes ajustaram-se os materiais do desenho inicialmente definidos por areia para ar com o intuito de inserir duas fontes.

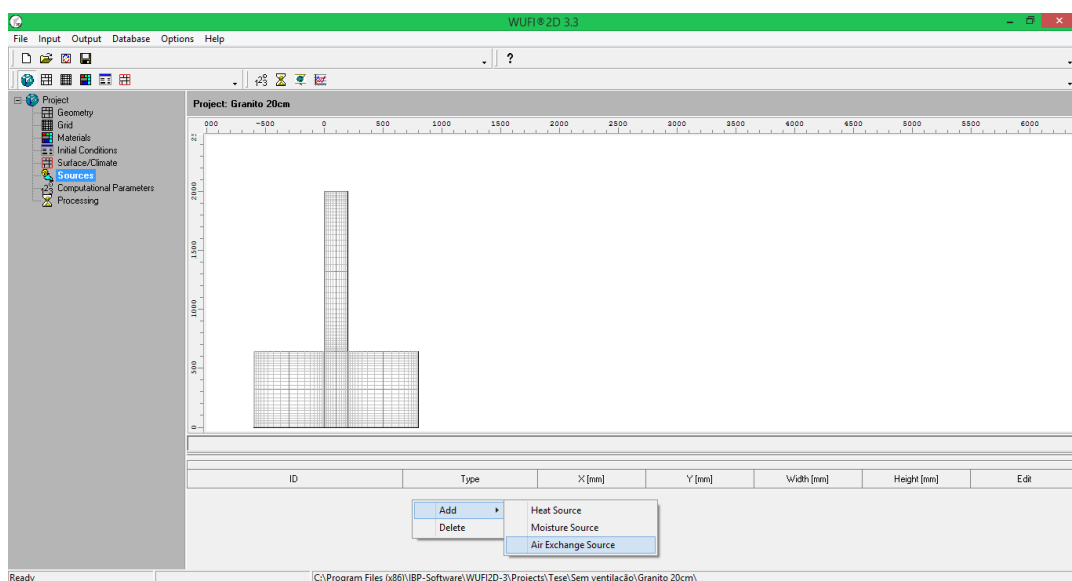


Fig. 3.23 – Adicionar nova fonte

Deste modo foram inseridas duas fontes de renovação de ar na base da parede tal como representadas na figura 3.24. Nas caixas de texto ‘‘X’’, ‘‘Y’’ define-se a localização do sistema e em ‘‘Width’’ e ‘‘Height’’ a espessura e altura. Neste caso foi atribuído um sistema de 0.20m por 0.20m.

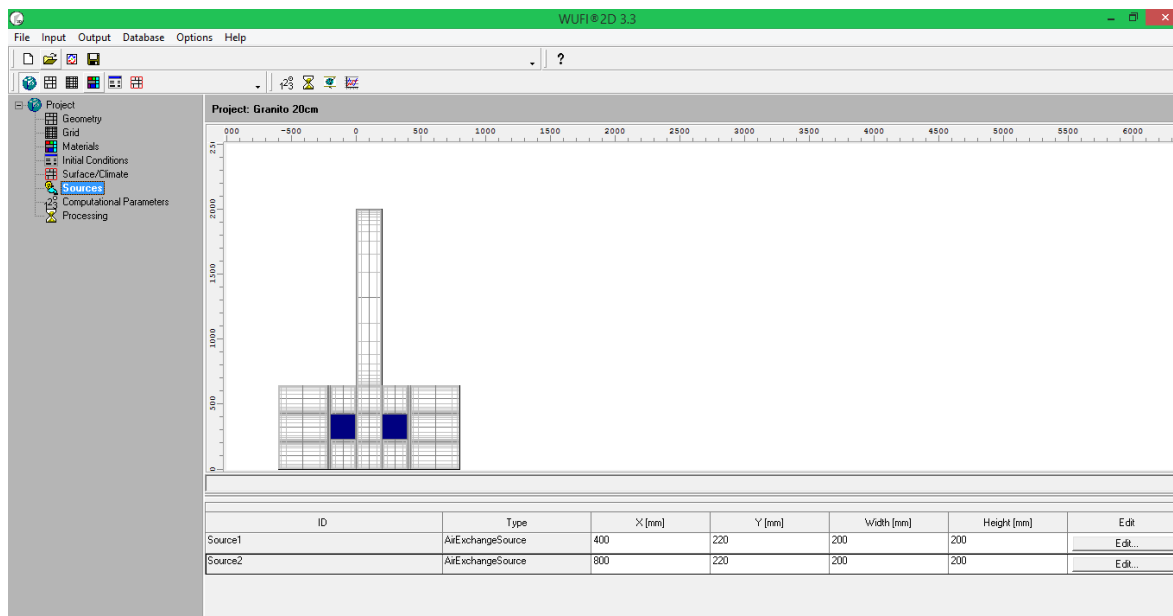


Fig. 3.24 – Características do sistema de ventilação

Em ‘‘Edit’’ é possível alterar as características das fontes inseridas como mostra a figura 3.25. No caso de renovação de ar é possível escolher o tipo de fonte definindo se se atribui um valor de renovações horárias constante (1) ou variável (2). Este último caso requer a importação de um ficheiro pré-definido pelo utilizador. Para esta simulação foi atribuído um valor de renovações horárias de $21.6h^{-1}$ correspondente a uma velocidade de $0.012m/s$.

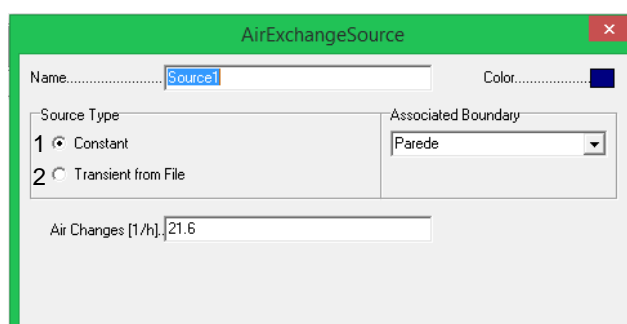


Fig. 3.25 – Características das fontes inseridas

3.3.9. PARÂMETROS COMPUTACIONAIS

Esta ferramenta é composta por duas secções: ‘‘Simple’’ e ‘‘Enhanced’’. Para esta simulação apenas se consideraram os parâmetros do separador ‘‘Simple’’.

Neste separador podem ser seleccionadas a data de início da simulação (1) e a duração da mesma (em horas) (2) (figura 3.26). Uma vez que a espessura da parede seleccionada para esta simulação é reduzida, considerou-se que dois anos seria suficiente para a sua secagem.

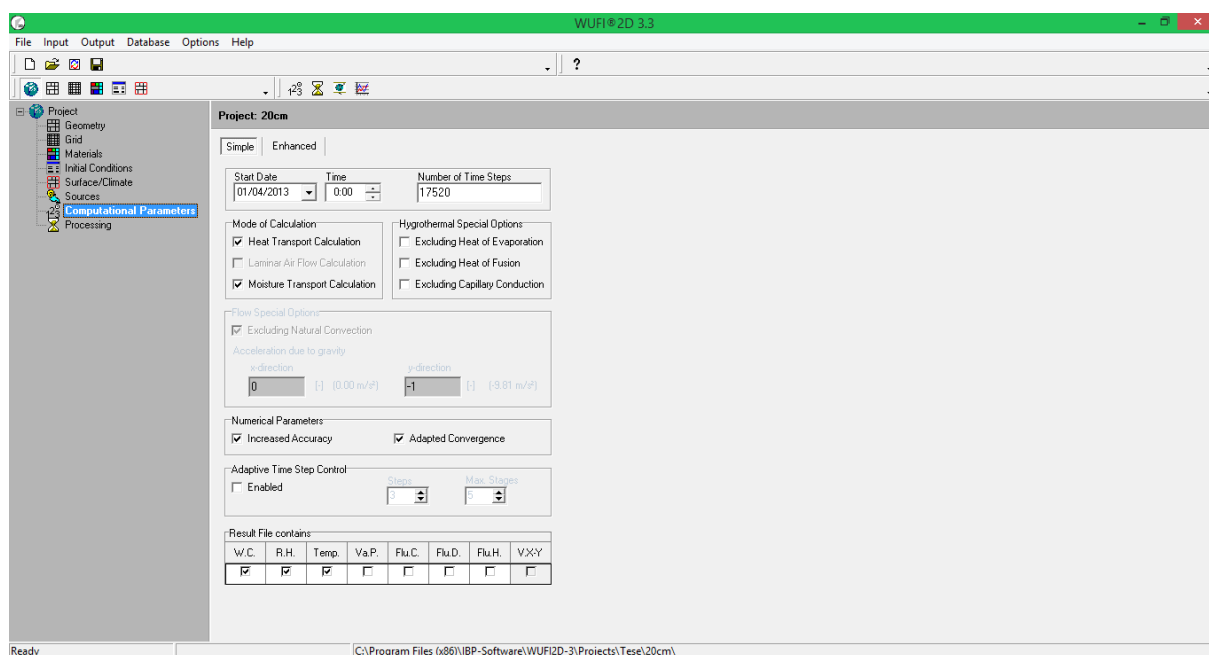


Fig. 3.26 – Separador “simple” da caixa de diálogo parâmetros computacionais

3.3.10. CÁLCULO

Para dar início ao cálculo é necessário clicar no botão “Start” (1) na caixa de diálogo de processamento (figura 3.27). Assim que começa o processamento do cálculo, ficam disponíveis duas opções “Suspend” (2) e “Terminate” (3) (figura 3.27), que permitem parar ou terminar todo o processo de cálculo, respetivamente.

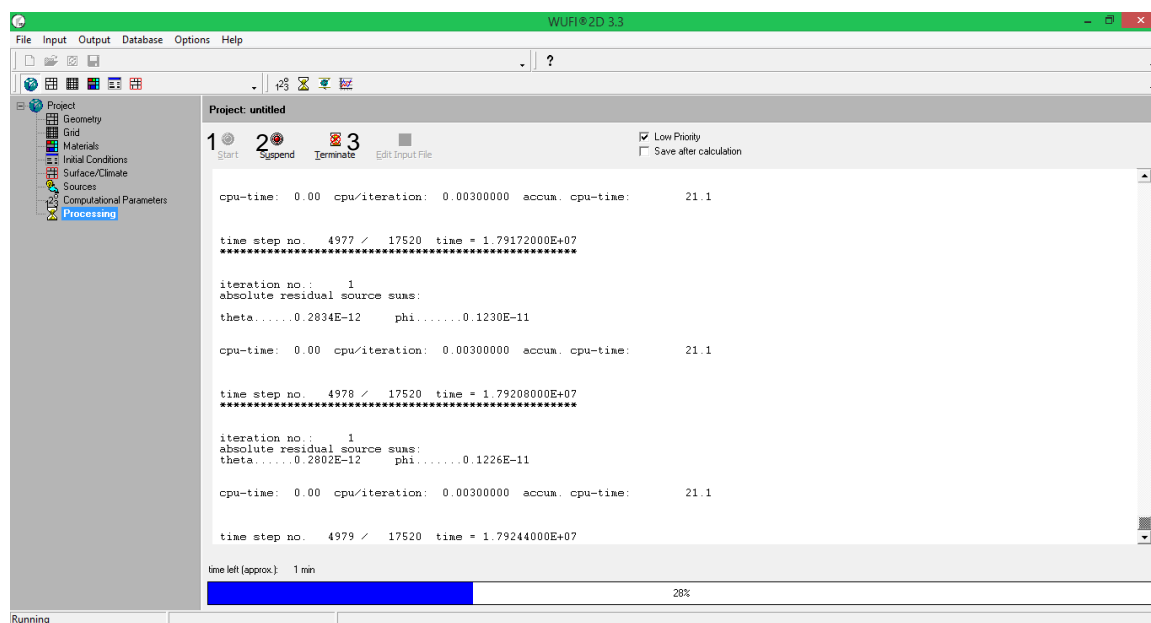


Fig. 3.27 – Caixa de diálogo processamento no decorrer da simulação

3.3.11. RESULTADOS

Em "Output" é possível seleccionar a janela que permite observar os resultados da simulação. Figura 3.28.

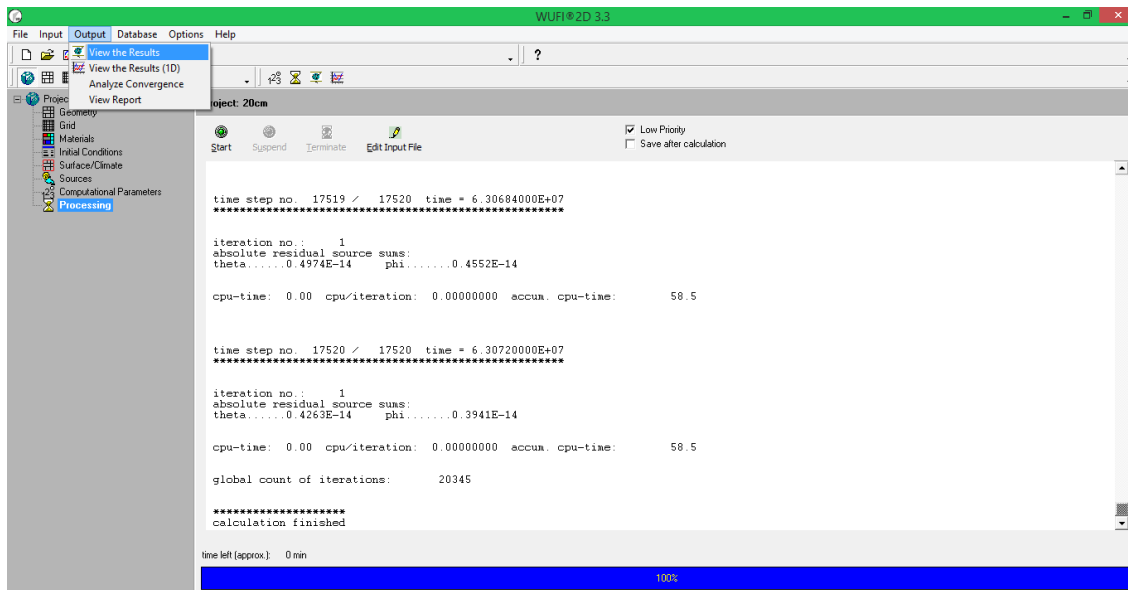


Fig. 3.28 – Ver resultados

A observação e interpretação dos resultados é possível por duas vias:

- Visualizar resultados na secção transversal do elemento: onde é possível analisar um filme 2D que apresenta a variação da temperatura, do teor de humidade e da humidade relativa ao longo do tempo de simulação na secção transversal do elemento de construção (figura 3.29).

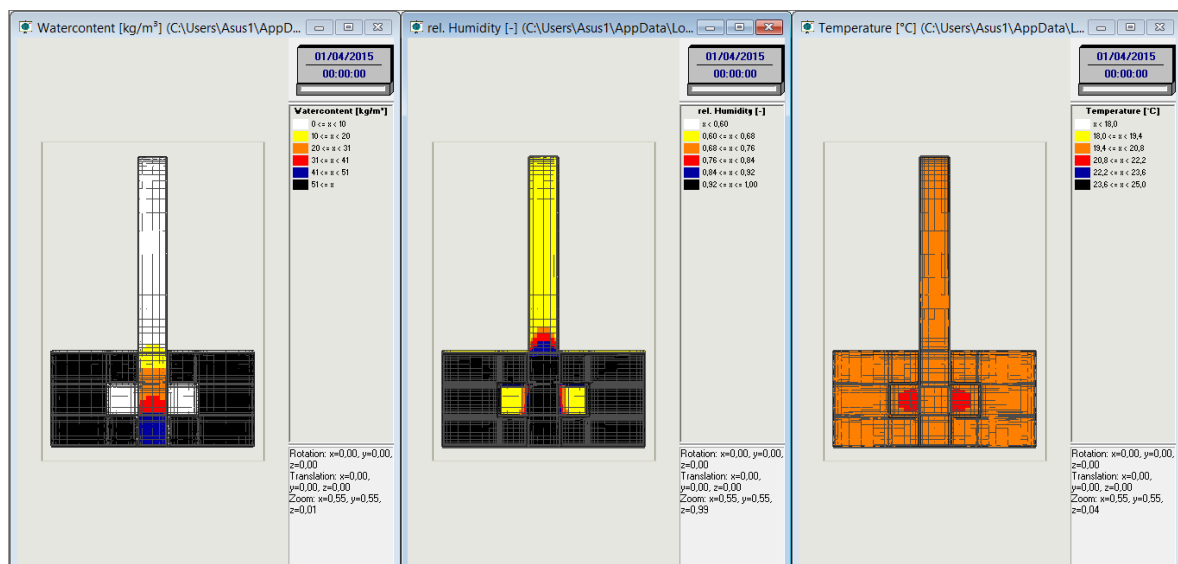


Fig. 3.29 – Resultados da simulação: temperatura, teor de humidade e humidade relativa

- Visualizar os resultados globais: onde é possível obter a variação dos parâmetros, ao longo do tempo de simulação, para a totalidade do elemento em estudo ou para um ponto específico deste (figura 3.30). Avaliando o gráfico é ainda possível exportar os dados como um ficheiro em formato .txt,. Este ficheiro permite um tratamento de dados exportando o ficheiro para o Excel onde a informação poderá ser avaliada de outra forma.

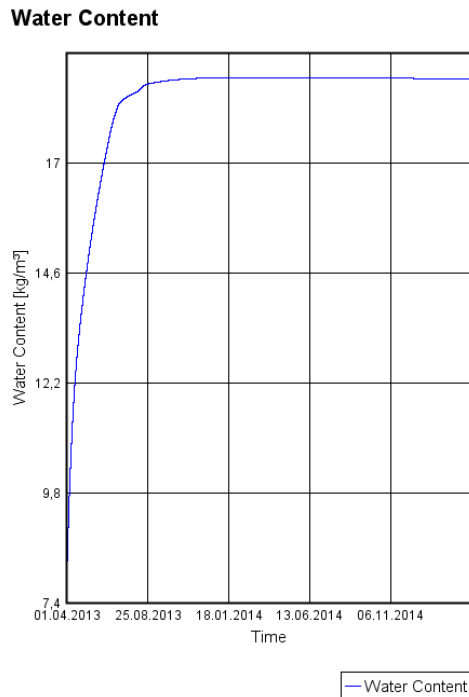


Fig. 3.30 – Teor de humidade num ponto específico do elemento em estudo

3.4. SÍNTESE DO CAPÍTULO

- Com o programa de cálculo automático WUFI 2D são várias as propriedades que se podem variar em consequência no desempenho dos elementos construtivos.
- Foi apresentado um exemplo para que se pudesse entender o funcionamento do programa.
- Foram apresentados os passos desde a introdução dos dados até a obtenção de resultados.
- É possível analisar fenómenos como a humidade ascensional e a secagem de paredes sujeitas a inundações.
- São recolhidos resultados fundamentais para a análise do problema da humidade.

4

SECAGEM DE EDIFÍCIOS NA SEQUÊNCIA DE INUNDAÇÃO/CHEIA COM E SEM UM SISTEMA DE VENTILAÇÃO NA BASE DAS PAREDES

4.1. INTRODUÇÃO

Conhecido o funcionamento do programa de cálculo utilizado, inicia-se o estudo da secagem das paredes. Com a introdução dos dados de entrada previamente definidos, o programa, permite o estudo do comportamento dos elementos de construção expostos às inundações.

O WUFI 2D versão 3.3 permite o cálculo da evolução temporal da temperatura, humidade relativa e teor de humidade viabilizando uma análise cuidada e completa das consequências e duração da secagem de uma parede saturada.

A humidade num edifício acarreta um grande desconforto, insegurança e degradação rápida da construção. É assim importante e essencial uma análise das consequências para a correção das patologias.

Neste capítulo serão detalhadas as simulações realizadas e apresentados os resultados cujo objetivo passa por analisar o teor de humidade de uma parede com e sem um sistema de ventilação aplicado na base.

4.2. PROPRIEDADES DAS VARIÁVEIS NECESSÁRIAS PARA AS SIMULAÇÕES

4.2.1. INPUT'S

Tendo em conta o número de edifícios potencialmente expostos a inundações, optou-se por focar a atenção apenas no Património Nacional.

As construções históricas apresentam características muito específicas com determinadas particularidades. A base em que são construídas, os materiais com que são constituídos, a localização e o clima, são tudo variantes que influenciam o seu comportamento ao longo dos anos. São estas particularidades, que variam de construção para construção, que os tornam distintos com maior ou menor vulnerabilidade.

Por forma a poder analisar diferentes cenários, é importante simular alguns parâmetros enquanto outros se mantêm constantes. Nas simulações a realizar irão avaliar-se os seguintes parâmetros:

- a espessura da parede;

- a implementação de um sistema de ventilação (com diferentes dimensões e velocidades).

4.2.1.1. Propriedades dos materiais

As características dos materiais ditam a forma como estes se comportam face à humidade. Assim, o teor de água presente é essencial para o conhecimento do comportamento dos materiais de construção.

Conhecer as características dos materiais é um dos primeiros passos para entender a sua relação com a humidade e identificar o problema a que está associado. O material escolhido foi o granito tendo-se optado por um material típico do Norte de Portugal nas construções mais antigas.

O granito é uma pedra muito utilizada na construção civil de cor clara composto por vários minerais como quartzo, micas e feldspatos. Apresenta uma textura muito granular e é caracterizado por ser uma rocha cristalina e muito dura [22].

Está presente em muitos edifícios e não só como em igrejas, casas, barragens e pavimentos de ruas e estradas. É muito utilizado pela sua resistência, é pouco afetado pelos agentes químicos e alterações climáticas e, por isso, torna-se interessante a sua análise. As propriedades higrotérmicas recolhidas da dissertação de Mestrado de M. Morais [20] deste material apresentam-se na tabela 4.1.

Relativamente aos materiais escolhidos para a envolvente da parede, para uma simulação mais real, irá optar-se por pedra arenosa que está presente na base de dados do programa como “Sander Sandstone”. As propriedades higrotérmicas deste material apresentam-se na tabela 4.1.

Para simular a caixa de ar do sistema de ventilação criou-se um material que simula o ar. As propriedades higrotérmicas deste material apresentam-se na tabela 4.1.

A envolver o sistema de ventilação estará uma membrana com o intuito de impermeabilizar o sistema. Terá de se escolher um material cuja densidade seja elevada para tal irá ser utilizada uma membrana com baixa porosidade que se encontra na base de dados como “PA-Membrane”. As propriedades higrotérmicas deste material apresentam-se na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Propriedades dos materiais

	Granito	Sander Sandstone	PA-Membrane	Ar
Massa Volúmica (kg/m ³)	2550	2120	65	1,23
Porosidade (m ³ /m ³)	0,125	0,17	0,001	0,999
Calor Específico (J/(kg.K))	850	850	2300	1008
Condutibilidade térmica (W/(m.K))	2,30	1,6	2,9	0.025
Fator de resistência à difusão de vapor (-)	55	33	4380	1
Teor de humidade de saturação (kg/m ³)	50	130	11.2	-
Coefficiente de Absorção de água (kg/(m ² .√s))	0,012	0,021	-	-

4.2.1.2. Curva higroscópica

Quando os materiais são submetidos a uma ambiência em que a humidade relativa varia, o seu teor de humidade também varia – materiais higroscópicos [14]. A representação dessa relação entre o valor de equilíbrio do teor de humidade de um material, no domínio higroscópico, e a humidade relativa da ambiência correspondente, é feita através da curva higroscópica (figura 4.1) [23].

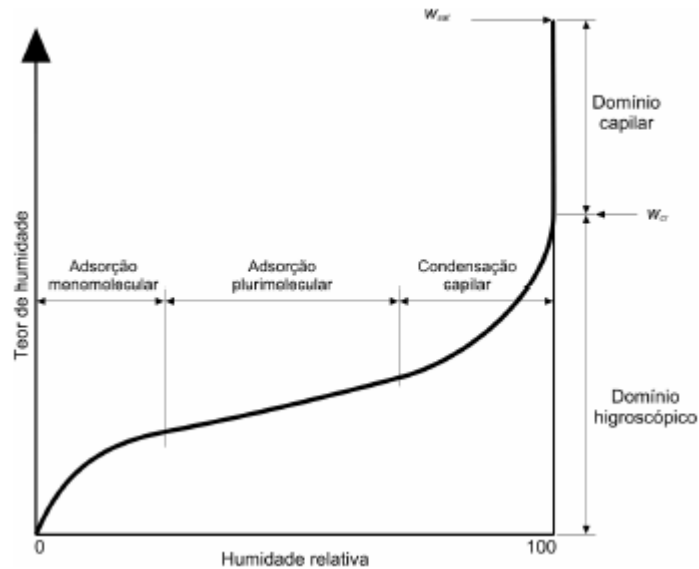


Fig. 4.1 – Percurso típico de uma curva higroscópica [23]

O comportamento de cada material é caracterizado pela não coincidência das curvas obtidas em adsorção (posição inferior) e desadsorção (posição superior) [23]. Esta não coincidência – histeresis – é algo difícil de explicar. Ver figura 4.2.

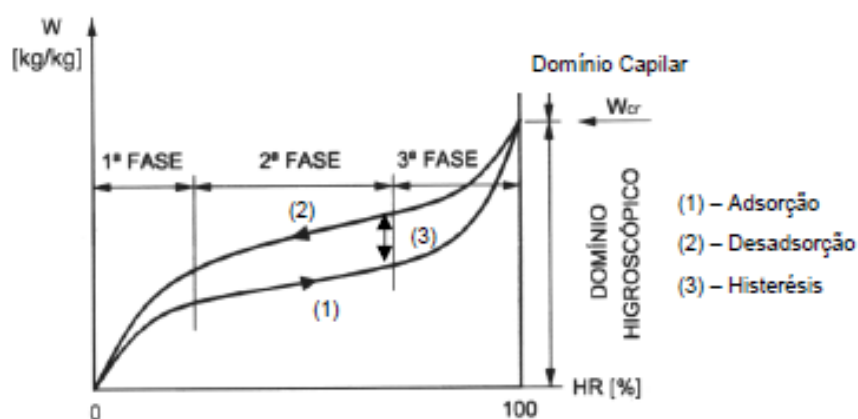


Fig. 4.2 – Comportamento higroscópico de materiais de construção em função da humidade relativa [14]

Em seguida apresenta-se as curva higroscópica do granito (tabela 4.2 e figura 4.3).

Tabela 4.2 – Curva higroscópica do Granito [20]

Humidade Relativa	Teor de Humidade (kg/m ³)	0,8	7
0	0	0,85	9,37
0,1	0,23	0,9	13,4
0,2	0,5	0,91	14,58
0,3	0,86	0,92	15,94
0,4	1,32	0,93	17,55
0,5	1,96	0,94	19,47
0,55	2,37	0,95	21,8
0,6	2,88	0,96	24,71
0,65	3,51	0,97	28,41
0,7	4,34	0,98	33,3
0,75	5,44	0,99	40,06
		1	50

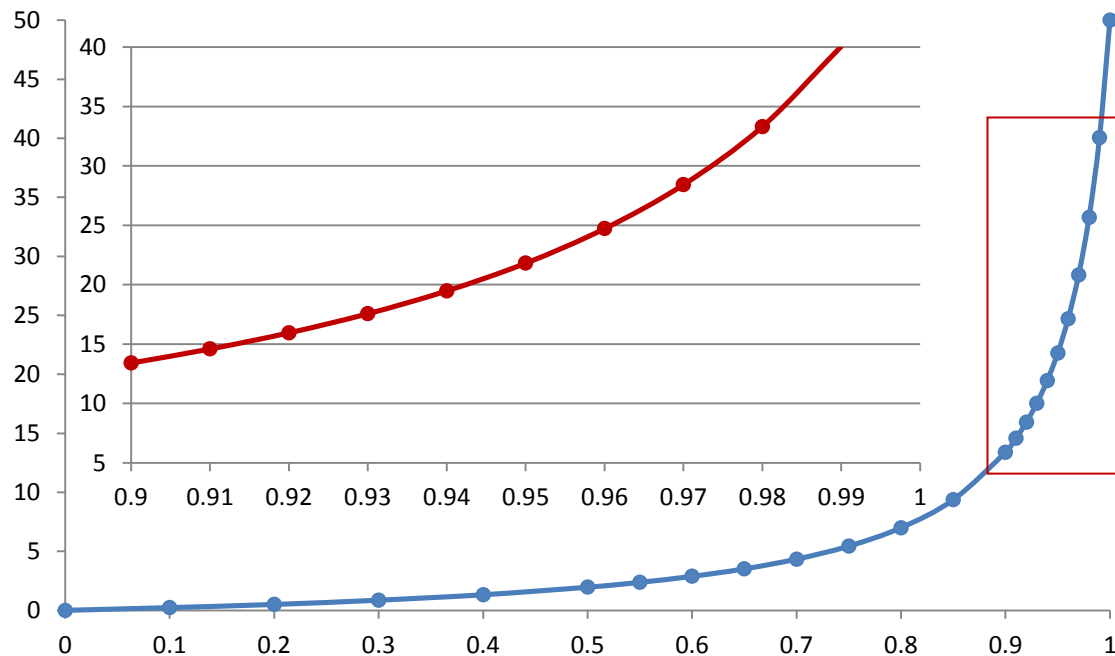


Fig. 4.3 – Representação e pormenor da curva higroscópica do granito

4.2.1.3. Clima exterior e interior

A degradação dos edifícios é também causada pelas condensações superficiais e internas nos elementos construtivos. Estas são influenciadas pelas alterações climáticas que afetam o desempenho higrotérmico dos monumentos. Assim, o parâmetro “clima” é um dos mais importantes neste estudo [24].

Os dados de entrada relativos ao clima exterior e interior corresponderão apenas aos valores da temperatura e da humidade relativa. Estes conceitos têm de ser entendidos de forma a encontrar a solução que melhor represente a realidade e a solução mais favorável à resolução do problema.

O clima exterior é definido como “tempo meteorológico médio” e a OMM – Organização Mundial de Meteorologia adotou um período de 30 anos para analisar as mudanças deste tempo meteorológico.

Os parâmetros que o definem são variáveis medidas e observadas na superfície da Terra como a temperatura, a humidade relativa, a precipitação e o vento [24].

Fatores climáticos como a pressão atmosférica, a latitude, a altitude, as correntes de marítimas, as massas de ar, o relevo e a vegetação, influenciam o clima devido às suas características e dinâmica [25]. Para além disso, a estação do ano que se vivencia também influencia o clima.

Quando se fala em humidade relativa fala-se na relação entre a quantidade de água existente no ar e a quantidade máxima que o ar, àquela temperatura, pode atingir. É um fator relevante na determinação do estado do tempo. Possui um limite máximo que, ao ser atingido, provoca o ponto de saturação [26].

A humidade relativa varia entre 0 e 1 e é apresentada normalmente em percentagem. O valor médio mundial é de 60% [26].

Considerar-se-á um clima exterior constante com o objetivo de não interferir com os outros parâmetros, ou seja:

- Temperatura exterior = 20°C
- Humidade Relativa = 60%

À semelhança do clima exterior, o clima interior será definido pela temperatura e pela humidade relativa. A diferença dos valores entre os climas não é muito significativa e, portanto, o desempenho higrotérmico será semelhante.

Para controlar o clima interior, existem mecanismos de aquecimento e arrefecimento. Contudo, os monumentos em estudo não estão dotados desses equipamentos para além de exigirem custos e manutenção [24].

Em relação à temperatura vai ser adotado o valor de 20°C tal como no clima exterior. Este valor pode prejudicar o desempenho higrotérmico do edifício no verão mas, como as condensações internas ocorrem essencialmente na estação fria, não prejudicará o desempenho do elemento na simulação [24].

Considerar-se-á um clima exterior constante com o objetivo de não interferir com os outros parâmetros, ou seja:

- Temperatura exterior = 20°C
- Humidade Relativa = 60%

4.2.1.4. Espessura da parede

A espessura da parede a considerar é também fundamental para o estudo da evolução de humidade. Pretende-se analisar uma parede de espessura reduzida, a partir de 20 cm comparada com espessuras elevadas e muito elevadas.

Com o intuito de abranger várias situações existentes nos edifícios em particular no património nacional, vão ser efetuadas simulações para espessuras de:

- 200 mm
- 400 mm
- 600 mm
- 800 mm
- 1000 mm
- 1200 mm
- 1400 mm

Desta forma será possível demonstrar as alterações provocadas nas várias hipóteses.

4.2.1.5. Geometria e número de renovações horárias do canal de ventilação

Um dos principais objetivos será comparar a influência de um sistema de ventilação na secagem de paredes. Por se ter mostrado uma mais-valia na resolução de problemas de humidade ascensional, vai ser agora testado na base das paredes na sequência de uma inundação.

O objetivo passa por testar várias soluções e selecionar a que melhor se adequa a cada situação. Com o modelo utilizado serão recolhidos os resultados relativos ao comportamento do sistema. Serão escolhidas as configurações já utilizadas noutros estudos.

A configuração do sistema apresenta-se na figura 4.4. Da ideia de ventilação natural passou-se rapidamente à necessidade de um processo mecânico controlado. Pretende-se estudar a sua geometria e avaliar parâmetros como a velocidade de circulação do ar.

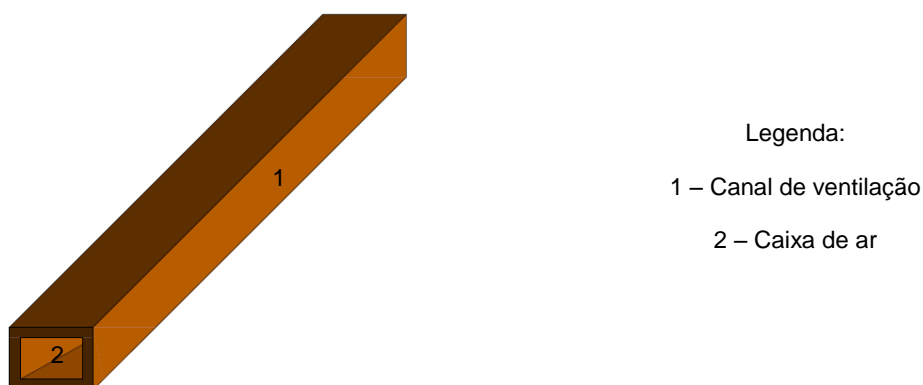


Fig. 4.4 – Configuração do sistema de ventilação

Para além de se analisar a secagem de uma parede com e sem um sistema de ventilação também se irão variar parâmetros do próprio sistema no sentido de encontrar a geometria e velocidades que otimizam a solução. Irão ser testadas alternativas à geometria do canal bem como da velocidade.

Serão usadas as dimensões:

- 20 cm x 20 cm
- 30 cm x 30 cm
- 40 cm x 40 cm
- 50 cm x 50 cm

Serão comparadas várias velocidades e, por isso, diferentes renovações horárias. A partir da expressão 4.1 exemplifica-se o cálculo do número de renovações horárias para uma área de 0.04 m² (sistema 20 cm x 20 cm).

$$Rph = \frac{Q}{V} = \frac{A \times u}{A \times L} = \frac{u}{L} (h^{-1}) \quad (4.1)$$

Rph : Número de renovações por hora (h⁻¹)

Q : Caudal (m³/h)

V : Volume (m³)

A : Área da Secção (m²)

u : Velocidade (m/h)

L : Comprimento do canal (m)

Tabela 4.3 – Velocidades e nº de renovações horárias de ventilação em estudo para um sistema de ventilação 20cm x 20cm

A : Área (m ²)	0.04	
L : Comprimento do canal (m)	2	
u : Velocidade (m/h)	43.2	144
u : Velocidade (m/s)	0.012	0.04
Nº de renovações horárias (h ⁻¹)	21.6	72

Como se pode ver pela equação 4.1, apenas a velocidade e o comprimento da tubagem influenciam o número de renovações horárias. Deste modo, estes valores mantêm-se iguais para um sistema de ventilação 30 cm x 30cm.

4.2.2. DEFINIÇÃO DA ALTURA MÁXIMA ATINGIDA PELA FRENTE HÚMIDA

Um dos principais objetivos é o de comparar os resultados obtidos nas simulações e analisar as principais vantagens e desvantagens da aplicação do sistema de ventilação. Para tal avalia-se o valor da altura máxima atingida pela frente húmida, nos tais casos.

Após a redistribuição da humidade são conhecidos dois teores de humidade: o teor de humidade crítico (w_{cr} – kg/m³) e o teor de humidade higroscópico (w_h – kg/m³, em equilíbrio com o ambiente). Entre estes dois valores existe um risco de ocorrência de cristalizações e dissolução de sais. Para determinar o valor de h_{max} será utilizado o valor do teor de humidade crítico. Esta altura correspondente ao teor de humidade crítico corresponde ao ponto a partir do qual a humidade relativa é inferior a 100% [17] (figura 4.5).

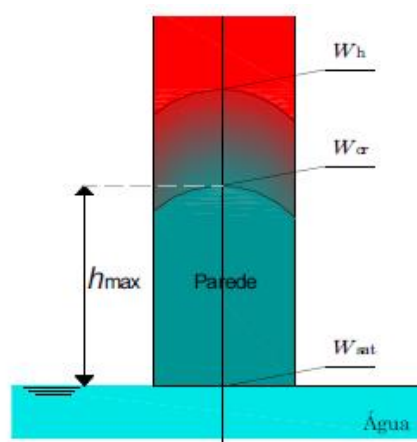


Fig. 4.5 – Definição de h_{max}

4.3. CONFIGURAÇÕES DAS SIMULAÇÕES APRESENTADAS

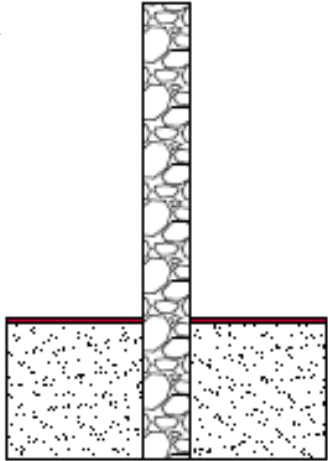
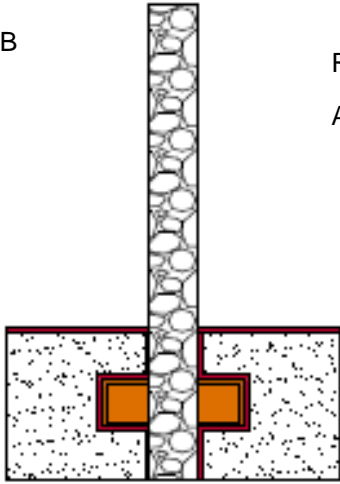
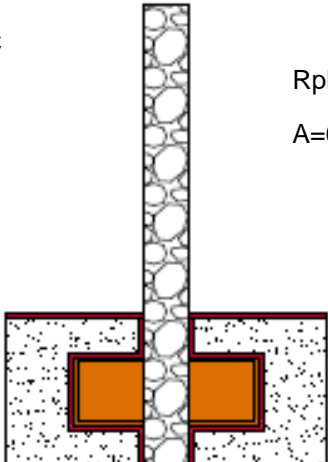
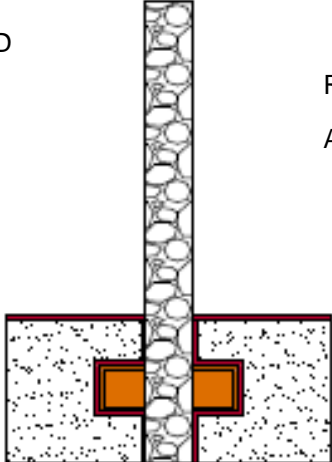
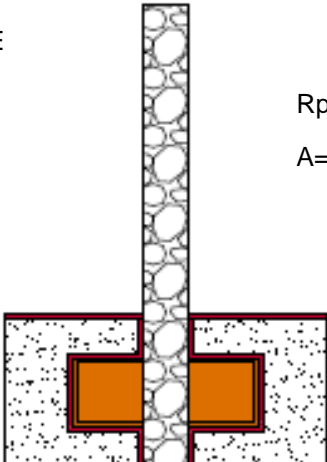
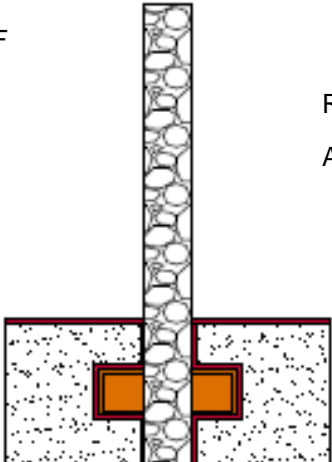
O estudo da secagem de paredes na sequência de uma inundação foi efetuado através de simulações com e sem sistema de ventilação variando parâmetros como a espessura e as características do canal de ventilação.

O tempo de simulação irá ser de dois anos. As condições climáticas irão simular as condições reais do meio ambiente mas sem a interferência de fatores como a chuva e o vento.

O terreno adjacente à parede permanecerá com uma humidade relativa de 70%.

As configurações analisadas apresentam-se nas tabelas 4.5 e 4.6.

Tabela 4.4 – Configurações geométricas analisadas

<p>A</p> 	<p>B</p> <p>$R_{ph}=21.6 \text{ h}^{-1}$ $A=0.20\text{m}\times0.20\text{m}$</p> 
<p>C</p> <p>$R_{ph}=21.6 \text{ h}^{-1}$ $A=0.30\text{m}\times0.30\text{m}$</p> 	<p>D</p> <p>$R_{ph}=72 \text{ h}^{-1}$ $A=0.20\text{m}\times0.20\text{m}$</p> 
<p>E</p> <p>$R_{ph}=72 \text{ h}^{-1}$ $A=0.30\text{m}\times0.30\text{m}$</p> 	<p>F</p> <p>$R_{ph}=43.2 \text{ h}^{-1}$ $A=0.20\text{m}\times0.20\text{m}$</p> 

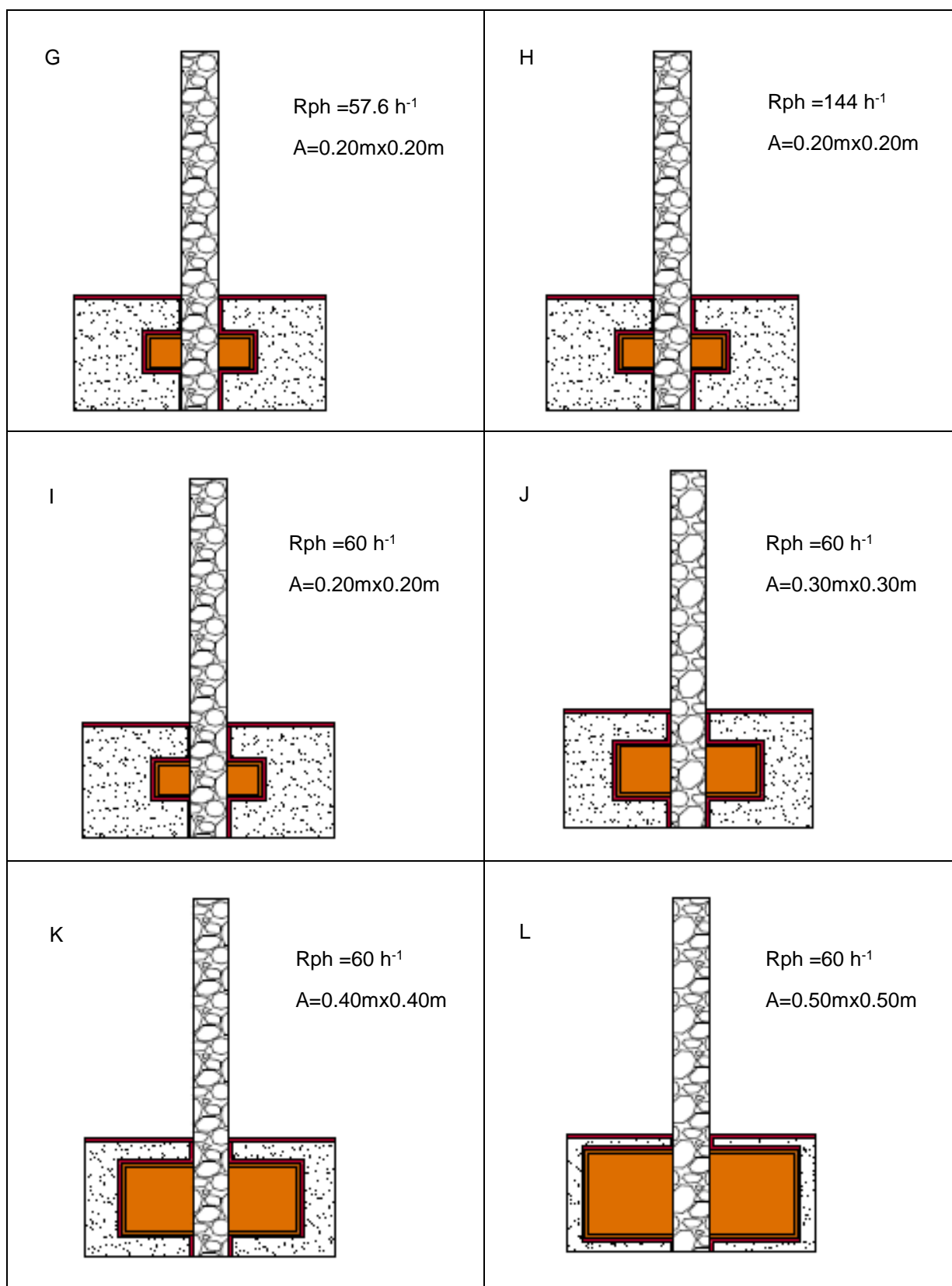


Tabela 4.5 – Combinações das simulações

Configuração	Material	Clima exterior	Ventilação	Dimensões do sistema	Nº de renovações horárias
A	Granito	C1*	Não	-	-
B	Granito	C1*	Sim	20 x 20	21.6
C	Granito	C1*	Sim	30 x 30	21.6
D	Granito	C1*	Sim	20 x 20	72
E	Granito	C1*	Sim	30 x 30	72
F	Granito	C1*	Sim	20 x 20	43.2
G	Granito	C1*	Sim	20 x 20	57.6
H	Granito	C1*	Sim	20 x 20	144
I	Granito	C1*	Sim	20 x 20	60
J	Granito	C1*	Sim	30 x 30	60
K	Granito	C1*	Sim	40 x 40	60
L	Granito	C1*	Sim	50 x 50	60

*O Clima C1 corresponde a uma temperatura $T=20^{\circ}\text{C}$ e uma humidade relativa $HR=60\%$.

4.4. GRANITO

4.4.1. COMPARAÇÃO DE CONFIGURAÇÕES COM E SEM SISTEMA DE VENTILAÇÃO

O estudo iniciou-se com a Configuração A (parede de granito) onde todos os restantes parâmetros se mantêm constantes e a única variante é a espessura da parede. A espessura inicial foi de 0.20m aumentando progressivamente até 1.4m em intervalos de 0.2. Figura 4.6.

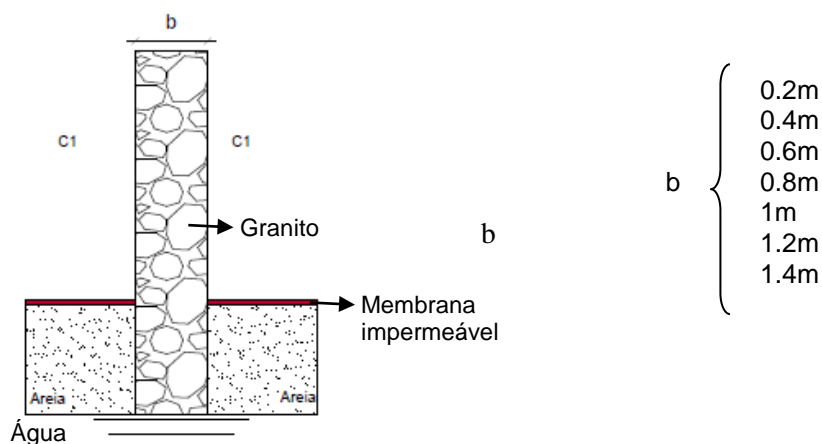


Fig. 4.6 – Configuração A

Posteriormente procedeu-se à instalação de um sistema de ventilação, inicialmente com uma geometria de 20cm x 20cm e com 21.6 h^{-1} e seguidamente, com o mesmo número de renovações horárias mas com geometria de 30cm x 30cm (configurações B e C).

Posteriormente efetuaram-se as mesmas simulações considerando um valor de 72 h^{-1} (configurações D e E). Figura 4.7.

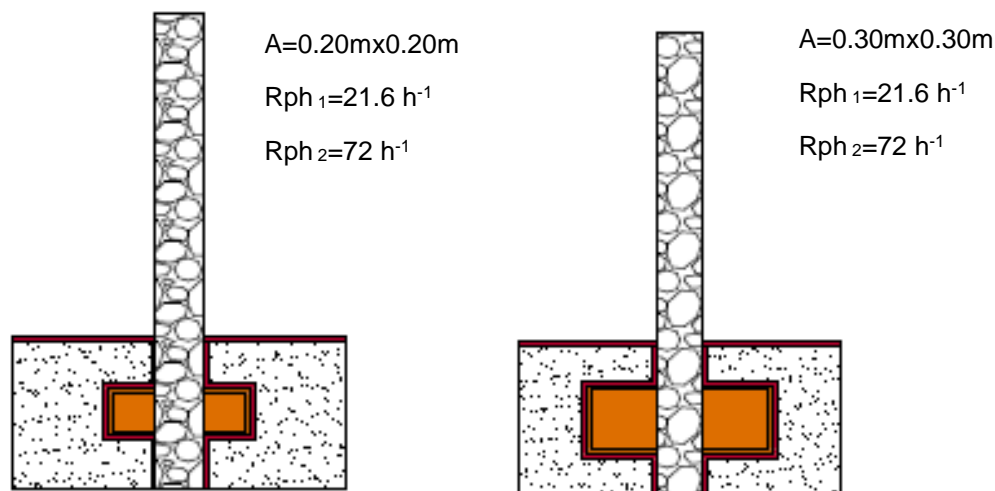
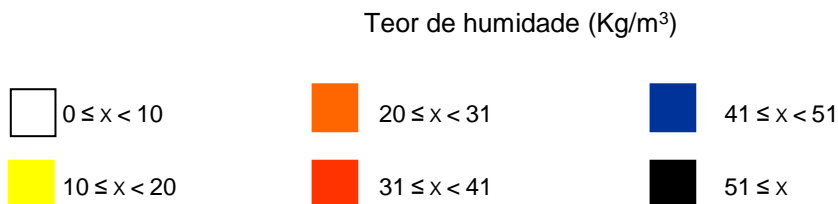


Fig. 4.7 – Configuração B, C, D e E

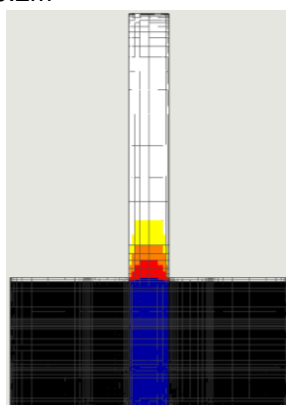
Em todas as simulações foi introduzida uma membrana na superfície do terreno. O sistema também foi impermeabilizado para garantir que não havia entrada de humidade no contacto do sistema com o terreno.

Os valores dos teores de humidade ao fim de dois anos podem ser visualizados nas figuras 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 retirados do WUFI 2D. Estas figuras representam o teor de humidade da parede ao fim de dois anos de simulação e apenas estão representadas as espessuras de 0.20m a 1m com intervalos de 0.20m.

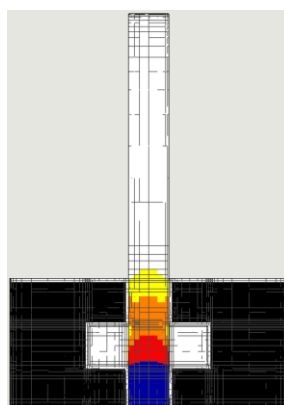
De salientar que a escala apresentada nas figuras está de acordo com a curva higroscópica do granito. Com a impermeabilização do terreno a areia continua saturada ao longo dos anos.



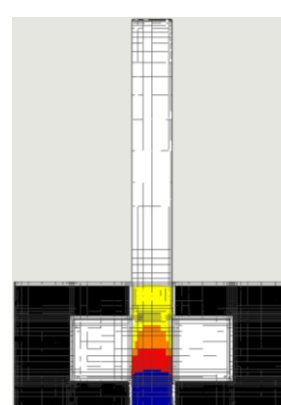
$b=0.2\text{m}$



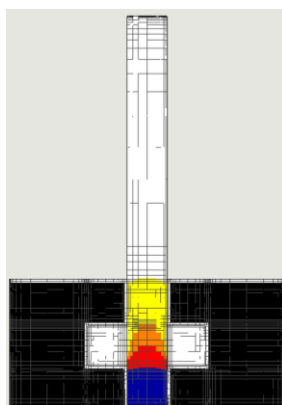
Conf. A
Sem sistema



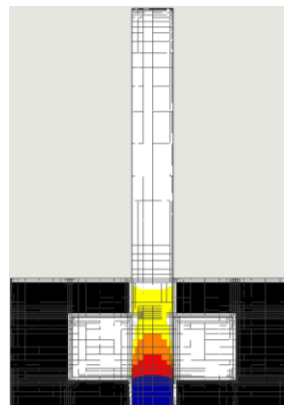
Conf. B
 $h_s=0.20\text{m}$
 $R_{ph1}=21.6\text{ h}^{-1}$



Conf. C
 $h_s=0.30\text{m}$
 $R_{ph1}=21.6\text{ h}^{-1}$



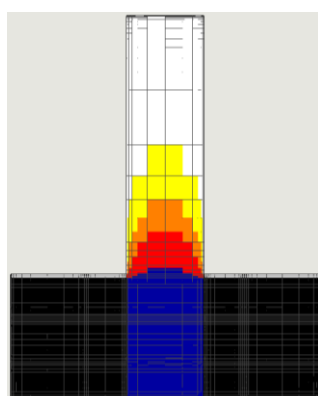
Conf. D
 $h_s=0.20\text{m}$
 $R_{ph2}=72\text{ h}^{-1}$



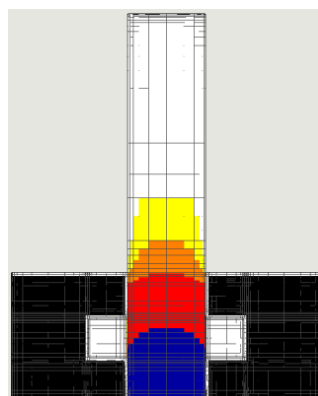
Conf. E
 $h_s=0.30\text{m}$
 $R_{ph2}=72\text{ h}^{-1}$

Fig. 4.8 – Configuração A, B, C, D e E para $b=0.20\text{m}$

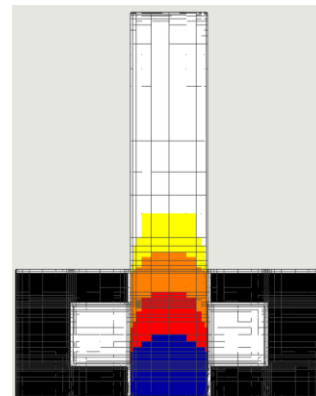
$b=0.4\text{m}$



Conf. A
Sem sistema



Conf. B
 $h_s=0.20\text{m}$
 $R_{ph1}=21.6\text{ h}^{-1}$



Conf. C
 $h_s=0.30\text{m}$
 $R_{ph1}=21.6\text{ h}^{-1}$

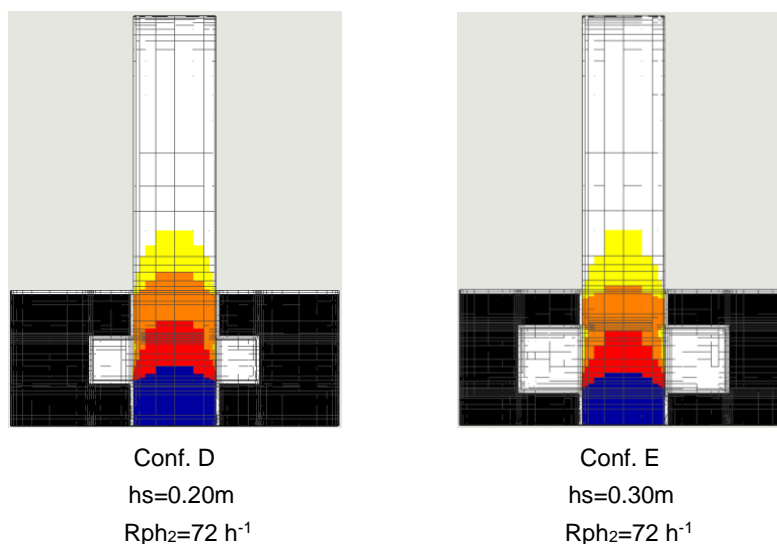


Fig. 4.9 – Configuração A, B, C, D e E para $b=0.40\text{m}$

$b=0.6\text{m}$

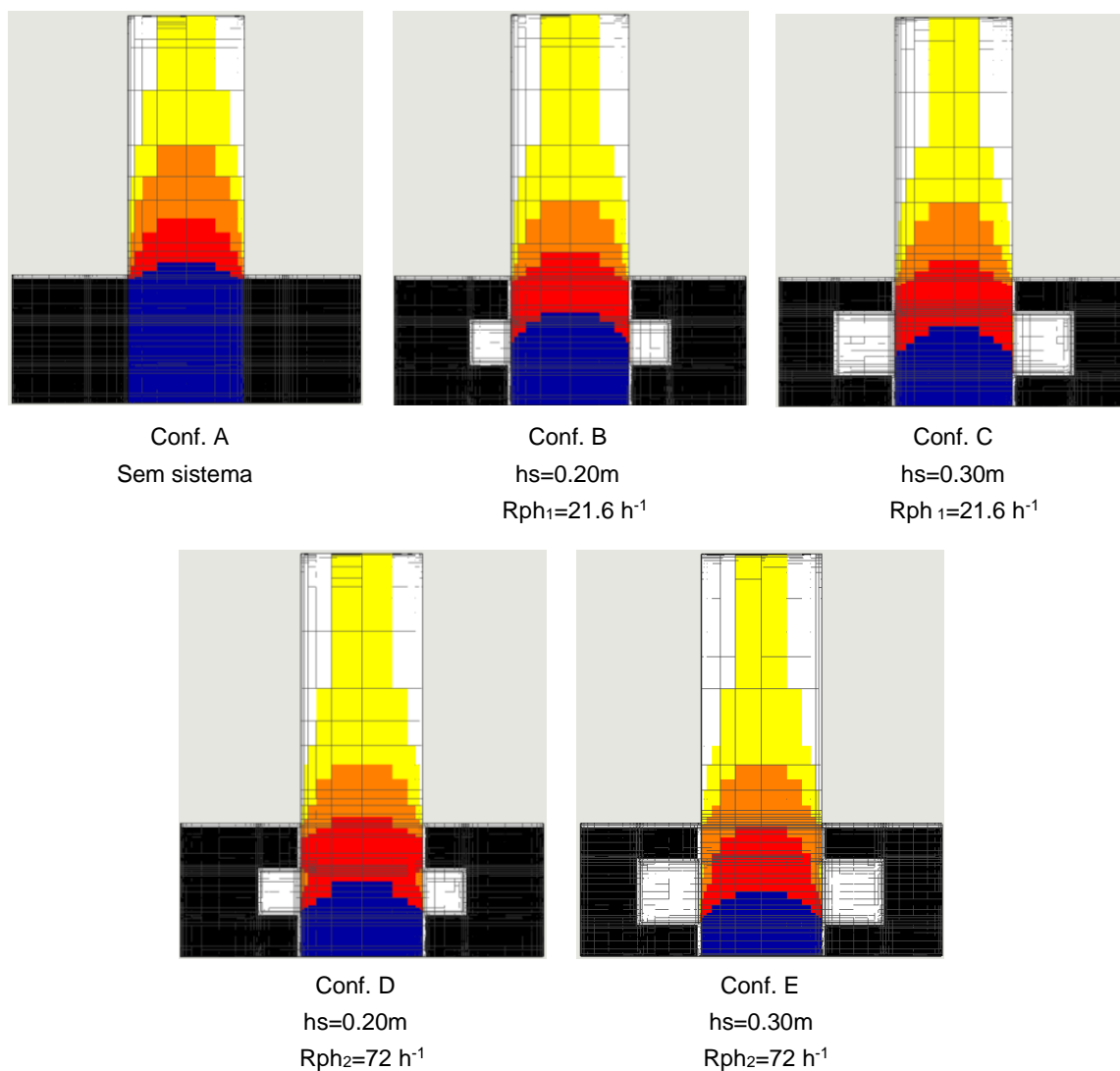


Fig. 4.10 – Configuração A, B, C, D e E para $b=0.60\text{m}$

$b=0.8m$

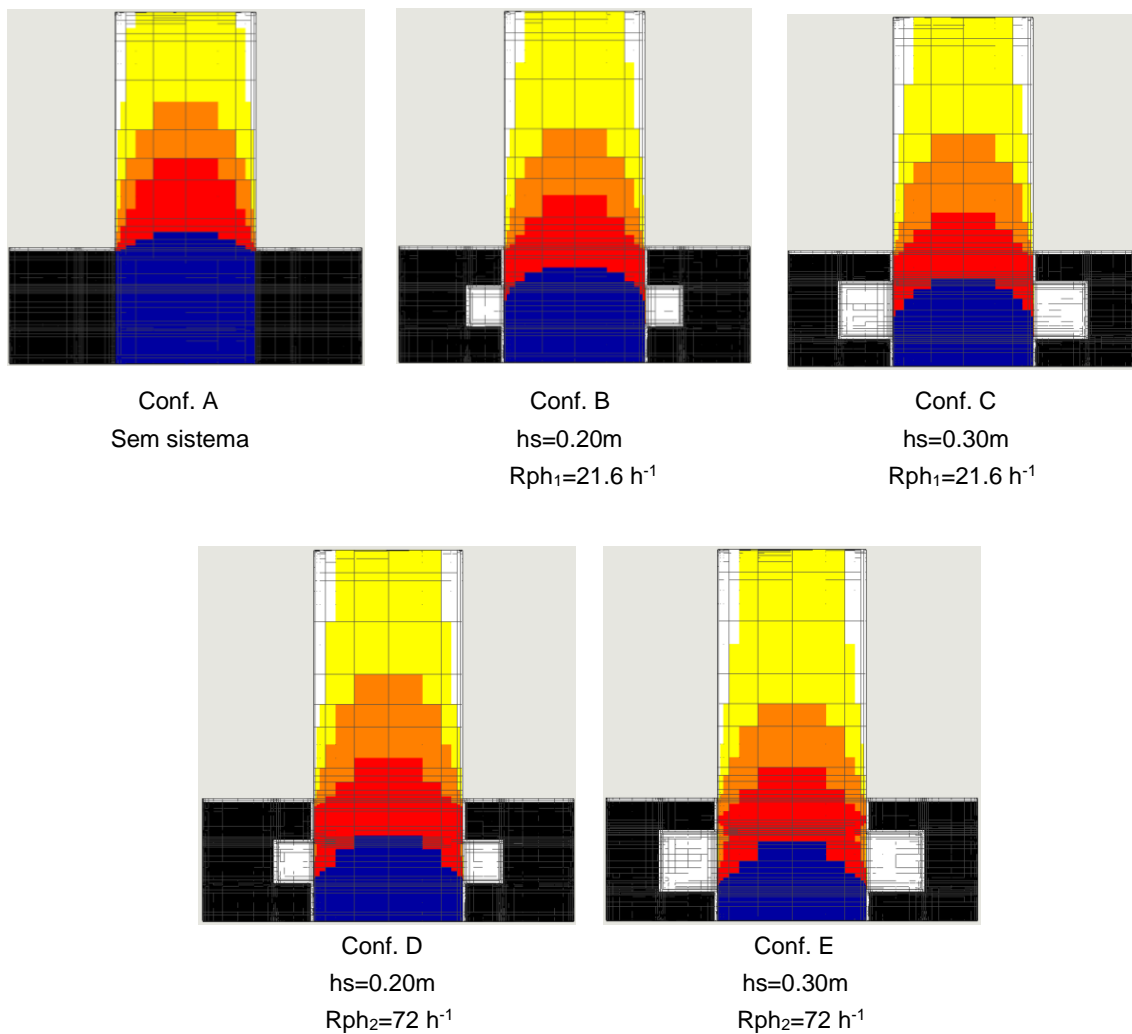
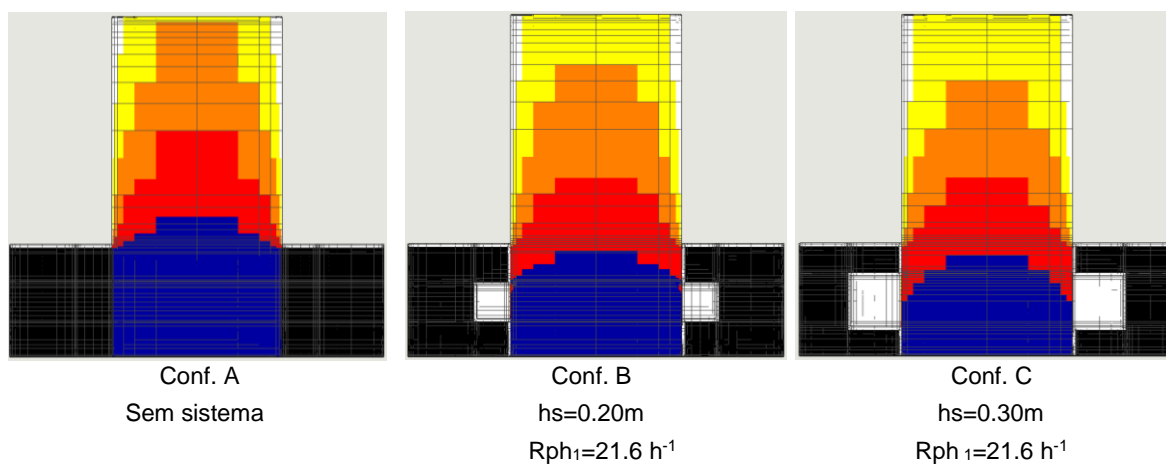
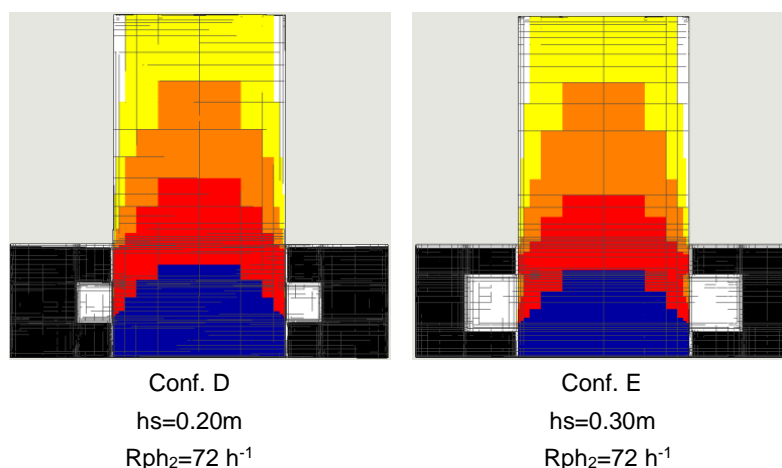


Fig. 4.11 – Configuração A, B, C, D e E para $b=0.80m$

$b=1m$



Fig. 4.12 – Configuração A, B, C, D e E para $b=1\text{m}$

Para todas as espessuras nota-se um decréscimo significativo no teor de humidade da Configuração A para a Configuração B, após a introdução do sistema $0.20\text{m} \times 0.20\text{m}$ com um R_{ph} de 21.6 h^{-1} . Inicialmente a zona correspondente ao intervalo $41 \leq x < 51\text{ Kg/m}^3$ encontra-se sensivelmente à altura do terreno envolvente e, após a introdução do sistema, essa altura desce substancialmente. Essa descida é tanto maior quanto menor for a espessura da parede. Ou seja, o decréscimo é maior numa parede de espessura de 20cm em relação a uma parede de 40cm que, por sua vez, é maior do que numa parede de 60cm e assim sucessivamente.

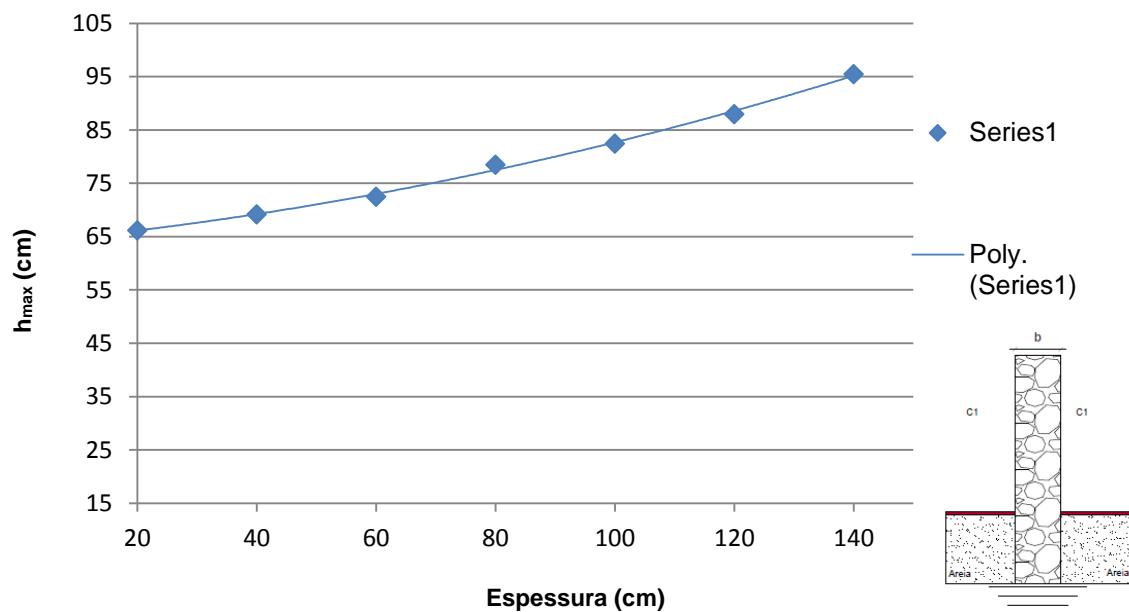
É também perceptível que o sistema de ventilação permite uma maior secagem nas paredes com uma menor espessura. Para a mesma configuração B, os valores do teor de humidade acima da linha da base do sistema situam-se no intervalo $31 \leq x < 41\text{ Kg/m}^3$ enquanto que nas restantes espessuras os valores encontram-se no intervalo $41 \leq x < 51\text{ Kg/m}^3$.

Para o mesmo número de renovações horárias (configuração B e C ou D e E), quanto maior for a geometria do sistema de ventilação menor é a altura da frente húmida. Para diferentes caudais (configuração B e D ou C e E), quanto maior for o geometria do sistema de ventilação menor é a altura da frente húmida.

De um modo geral pode-se comprovar que as características da Configuração E são as que mais reduzem a frente húmida.

Com o objetivo de melhor analisar os resultados obtidos, foram recolhidos os valores da altura da frente húmida para as várias simulações realizadas. O critério utilizado neste trabalho para a definição desta altura, designada por h_{max} (m), é explicado e exemplificada na figura 4.5.

Recolhidos estes valores foi possível construir a figura 4.13 referente à configuração A.

Fig. 4.13 – h_{max} das simulações numéricas. Configuração A

Verifica-se que, para estas condições, à medida que a espessura da parede aumenta, o valor de h_{max} aumenta também. O crescimento polinomial apresentado permite concluir que quanto maior é a espessura maior é a altura de frente húmida. Contudo, este aumento da altura de frente húmida, para cada intervalo de 20 cm vai diminuindo progressivamente, facto observado nos declives das retas que são sucessivamente menores.

Aos valores obtidos na figura 4.13 ajustou-se uma função que permitisse calcular h_{max} para qualquer que seja a espessura da parede. A função obtida encontra-se representada na figura 4.13 e apresenta um crescimento polinomial com um $R^2=0.9974$. A equação 4.2 permite chegar à função:

$$y = 0.0009x^2 + 0.1015x + 63.771 \quad (4.2)$$

Para avaliar a reprodutibilidade destes resultados relativamente às restantes configurações apresenta-se na figura 4.14 os valores de h_{max} para cada configuração e espessura.

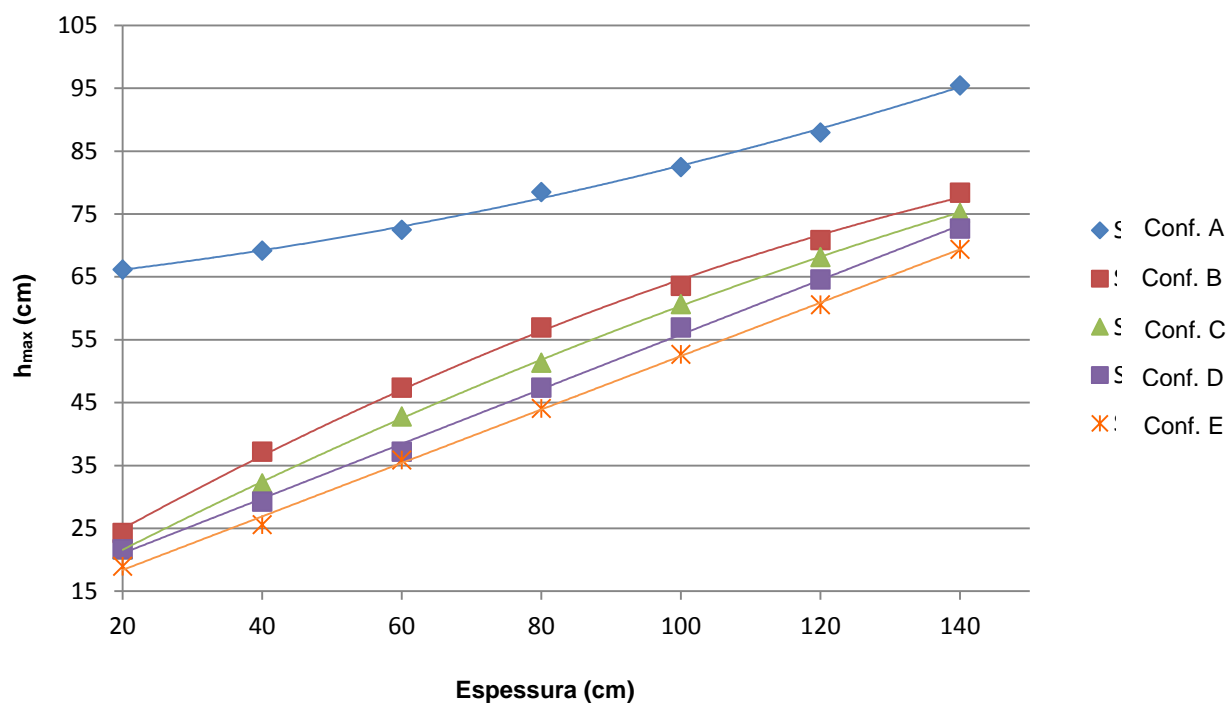


Fig. 4.14 – h_{max} das simulações numéricas. Configuração A,B, C, D e E

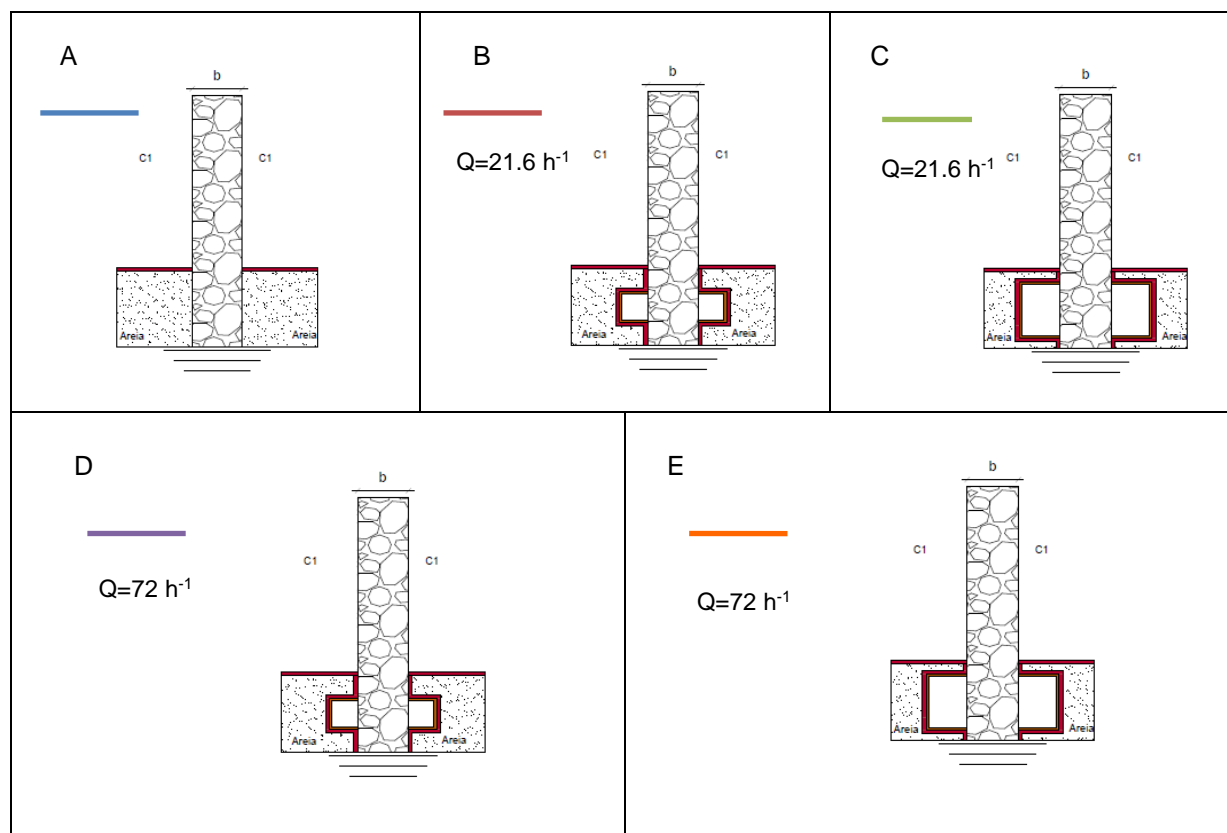


Fig. 4.15 – Configuração A, B, C, D e E

Na figura 4.14 observa-se que qualquer uma das configurações dotadas de sistema de ventilação é melhor quando comparada com a parede sem qualquer tipo de mecanismo.

Ao contrário do que acontece para a Configuração A, verifica-se, pelas funções de ajuste traçadas, que qualquer configuração com sistema de ventilação, independentemente das suas características, tende a estabilizar a partir de uma certa espessura. Chegará um momento à partir do qual aumentar a geometria ou o número de renovações horárias de ventilação já não irá trazer vantagens.

De entre todas as hipóteses, a Configuração B é aquela que, mesmo apresentando vantagens significativas, menores resultados traz ao estudo. A sua função de ajuste pode ser definida pela equação 4.3:

$$y = -0.0014x^2 + 0.6653x + 12.2 \quad (4.3)$$

A Configuração C e D apresentam valores muito semelhantes contudo verifica-se que para uma solução mais eficiente é preferível aumentar o número de renovações horárias de ventilação do que a geometria do sistema. Em ambas as configurações é notório o decréscimo dos declives à medida que a espessura aumenta concluindo-se uma vez mais que as espessuras menores têm melhores resultados de secagem.

Analisando agora a solução mais vantajosa para o problema considera-se que a melhor solução para combater a humidade numa parede de granito com as características definidas passa por instalar um sistema de ventilação com dimensões de 30cm x 30cm com um Rph de 72 h⁻¹. Esta solução é capaz de diminuir até aproximadamente 45cm da frente húmida sendo uma redução bastante satisfatória. A curva de ajuste traçada é definida pela equação:

$$y = -6 \times 10^{-6} x^2 + 0.426x + 9.8714 \quad (4.4)$$

À medida que a espessura aumenta os declives das retas diminuem. Contudo, esta redução não é muito significativa atendendo ao facto que esta solução não será benéfica para espessuras muito elevadas. Esta função tende a estabilizar e a tornar-se constante para espessuras superiores.

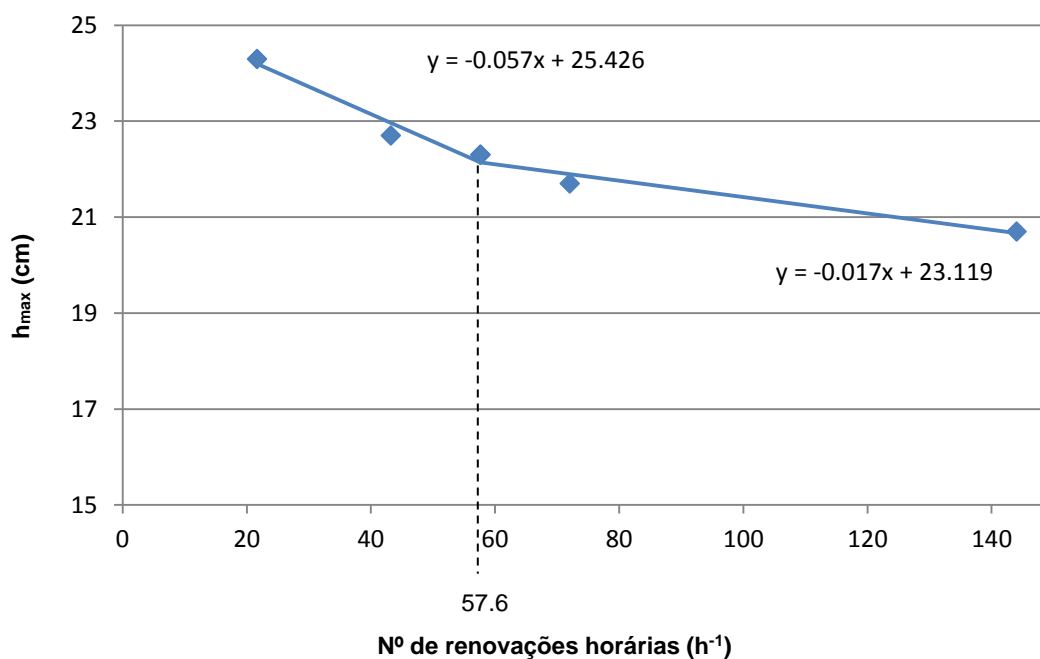
4.4.2. VARIAÇÃO DAS VELOCIDADES DE VENTILAÇÃO

Realizaram-se novas simulações designadas de Configuração B, D, F, G e H onde, para casa espessura, foram testados vários caudais desde os 21.6h⁻¹ até aos 144 h⁻¹. Estes valores foram obtidos de acordo com a velocidade atribuída tal como se pode consultar na tabela 4.7. Os modelos foram testados para a parede de granito com as condições já definidas anteriormente e dotada de sistema de ventilação com geometria de 0.20m x 0.20m.

Tabela 4.6 – Velocidades testadas nas simulações

Sistema 20x20					
A (m ²)	0,04				
Configuração	Conf. B	Conf. F	Conf. G	Conf.D	Conf. H
V (m/s)	0,012	0,024	0,032	0,04	0.08
NR/h (h ⁻¹)	21,6	43,2	57,6	72	144

Para a espessura de 20cm foram recolhidos os valores de h_{\max} correspondentes à altura de frente húmida para cada valor de número de renovações horárias (figura 4.16).

Fig. 4.16 – h_{\max} para cada valor de renovação horária. $b=20\text{cm}$

Na figura 4.16 observa-se que a relação entre as duas variáveis não é linear. Contudo, verifica-se que para valores acima e abaixo de 57.6 h^{-1} poderá ser efetuada uma aproximação de duas retas: uma para valores inferiores e outra para valores superiores.

Quanto maior é o número de renovações horárias introduzido, menor é o h_{\max} . O decréscimo deste valor é positivo uma vez que quanto menor é a altura de frente húmida, menor é o teor de água na parede logo a secagem da parede é maior.

Esta análise foi efetuada para as espessuras de 40, 60, 80, 100 cm. Apresentam-se agora os resultados para esta última espessura com o intuito de comparar os valores de h_{\max} quando existe uma diferença na espessura da parede de 1m (figura 4.17).

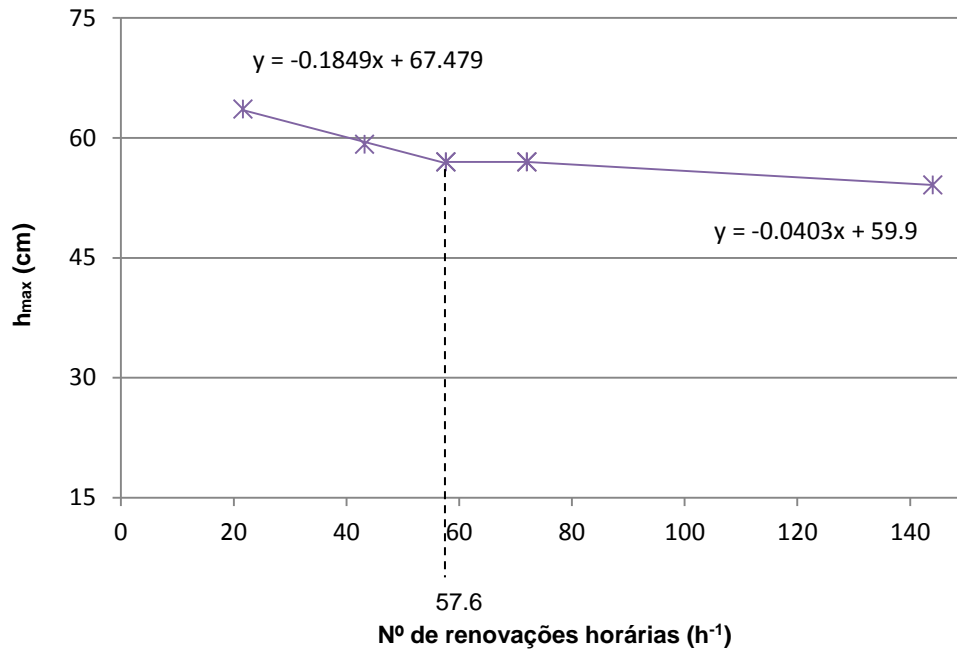


Fig. 4.17 – h_{\max} para cada valor de renovação horária. $b=100$ cm

O comportamento para uma parede de 1m é semelhante ao da espessura de 0.20m. Também se verifica que não há uma relação linear entre as variáveis mas que existe uma diferença para valores superiores e inferiores a um Rph de $57.6 h^{-1}$. A aproximação linear dos valores mostra que para dois caudais elevados distintos, o valor de h_{\max} é constante não havendo qualquer diferença não se justificando a adoção de um Rph de $72 h^{-1}$.

Tal como na figura 4.16, aqui também se comprova que quanto maior é o caudal menor é o h_{\max} . Contudo, verifica-se que estes valores são bastantes mais elevados do que na parede de menor espessura. Esta diferença pode ser observada na figura 4.18.

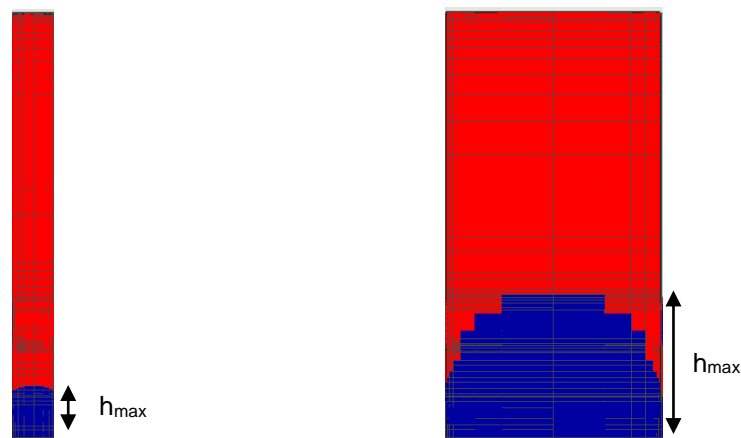


Fig. 4.18 – Representação do h_{\max} , ao fim de dois anos de simulação, para $b=0.2$ m e $b=1$ m, respetivamente

Para um número de renovações horárias de 57.6 h^{-1} a altura de frente húmida atingida é muito menor na parede de menor espessura. Isto significa que, perante as mesmas condições, as soluções adotadas, embora sejam benéficas para todas as configurações, são mais eficazes quanto menor for a espessura da parede.

Na figura 4.19 estão representadas as alturas correspondentes aos caudais para cada espessura.

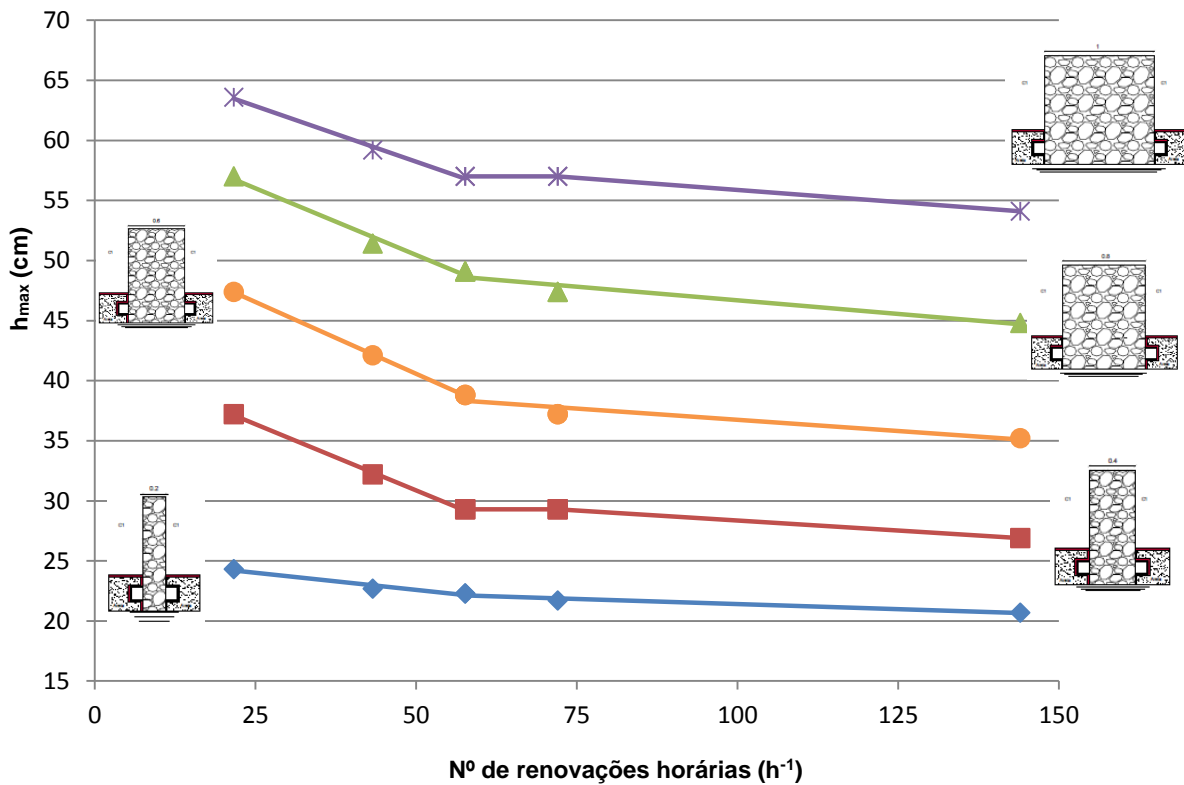


Fig. 4.19 – h_{max} para cada valor de renovação horária

Para todas as espessuras o comportamento entre as variáveis é semelhante. Através da análise das figuras conclui-se que:

- A relação entre as duas variáveis: Rph e h_{max} , não é linear;
- Para a mesma espessura, quanto maior é o Rph menor é h_{max} permitindo uma secagem mais rápida sendo que cada vez é menos eficaz aumentar o caudal;
- Para diferentes espessura e Rph iguais, quanto maior é a espessura maior é o h_{max} , ou seja, quanto maior é a espessura mais tempo demora a secagem;
- Pode-se efetuar uma aproximação de duas retas para valores superiores e inferiores a 57.6 h^{-1} ;
- Considera-se o Rph de 56.7 h^{-1} um valor interessante (para estas características) pois a partir desse valor não há uma diminuição significativa do h_{max} .

4.4.3. VARIAÇÃO DA GEOMETRIA DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO

Analisada já a influência que o número de renovações horárias apresenta em função da espessura analisou-se a influência da geometria do sistema de ventilação. Deste modo definiram-se as configurações I, J, K, L.

A cada geometria atribuiu-se o número de renovações horárias de 60 h^{-1} , valor aproximado da solução considerada ideal em 4.4.2. Para cada espessura registaram-se os valores de h_{\max} apresentados na figura 4.20.

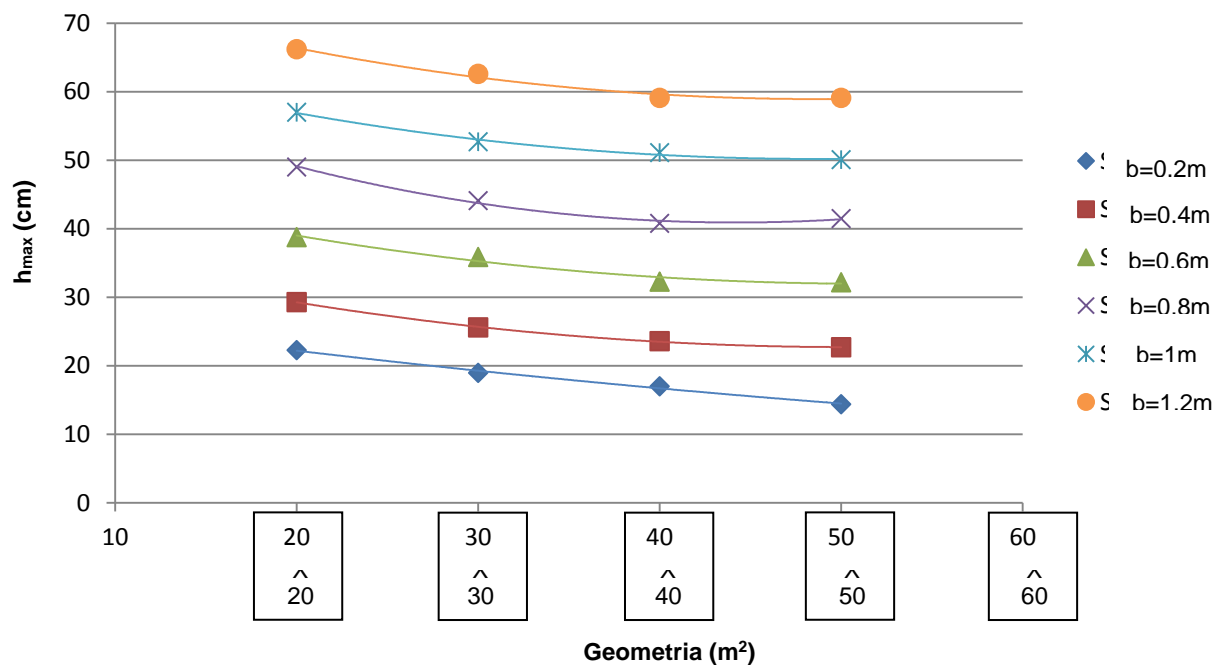


Fig. 4.20 – h_{\max} para cada geometria

Uma vez mais se verifica que qualquer sistema é mais eficaz quanto menor for a espessura da parede.

Pelo comportamento das curvas de ajuste traçadas atenta-se que o h_{\max} a partir da instalação de um sistema de dimensões $0.40\text{m} \times 0.40\text{m}$ tende para um valor quase estável. Esta observação excetua-se para a parede de 20cm de espessura onde os seus valores só começam a apresentar um comportamento constante a partir da instalação de um sistema de dimensões $0.50\text{m} \times 0.50\text{m}$. Observa-se que:

- Para $b=0.2$, h_{\max} não irá tomar valores abaixo dos 10cm ;
- Para $b=0.4$, por mais que se aumente a geometria do sistema, a parede só irá secar até um h_{\max} de 20cm ;
- Para $b=0.6$, h_{\max} tende a estabilizar aos 30cm ;
- Para $b=0.8$, h_{\max} não irá ultrapassar valores inferiores a 40cm ;

- Para $b=1\text{m}$, os valores de h_{max} andarão aproximadamente nos 50cm;
- Para $b=1.2\text{m}$, h_{max} tornar-se-á constante para valores ligeiramente inferiores a 60cm.

Desta análise se conclui que, aumentando a espessura a altura máxima atingida pela frente húmida cresce 10cm no fim do período de secagem. Esta diferença pode é traduzida na figura 5.16.

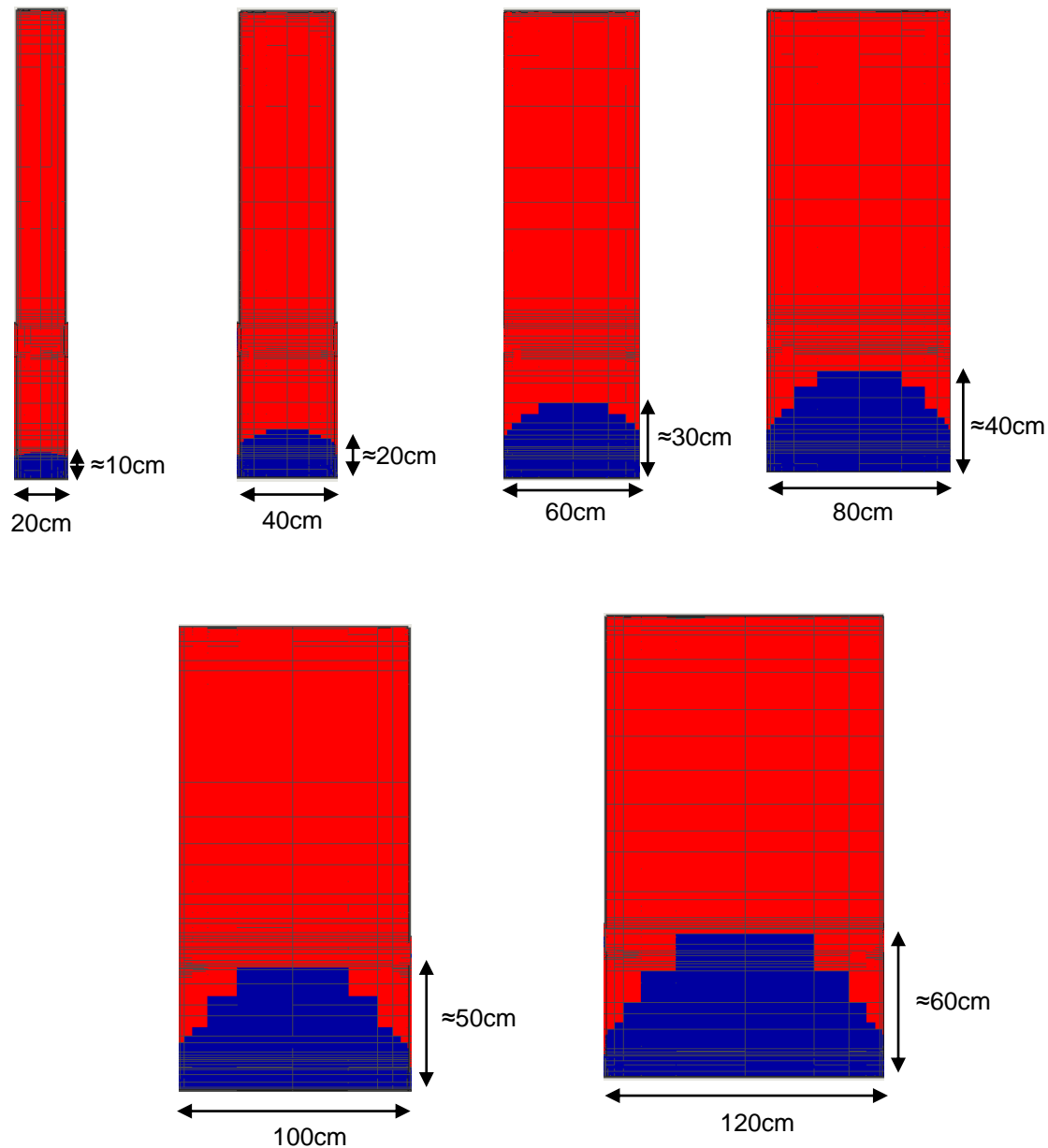


Fig. 4.21 – h_{max} atingida para cada espessura

É interessante verificar que a altura máxima de frente húmida é aproximadamente metade do valor da espessura da parede.

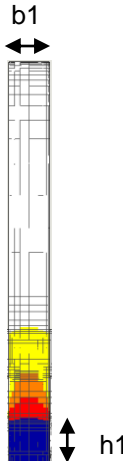
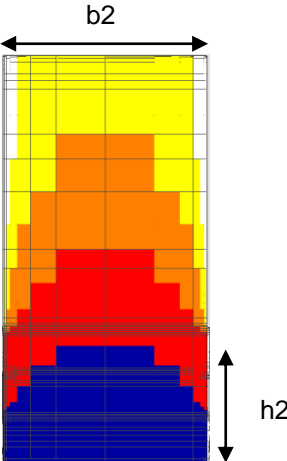
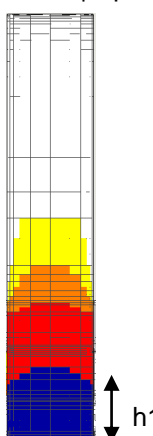
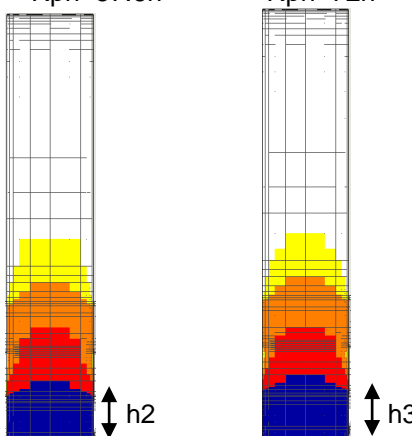
Habitualmente, as paredes de edifícios históricos e o património nacional apresentam espessuras entre 80 e 120cm pelo que se verifica que continuar a aumentar a geometria do sistema de ventilação não trará benefícios quando se pretenda secar as respetivas paredes.

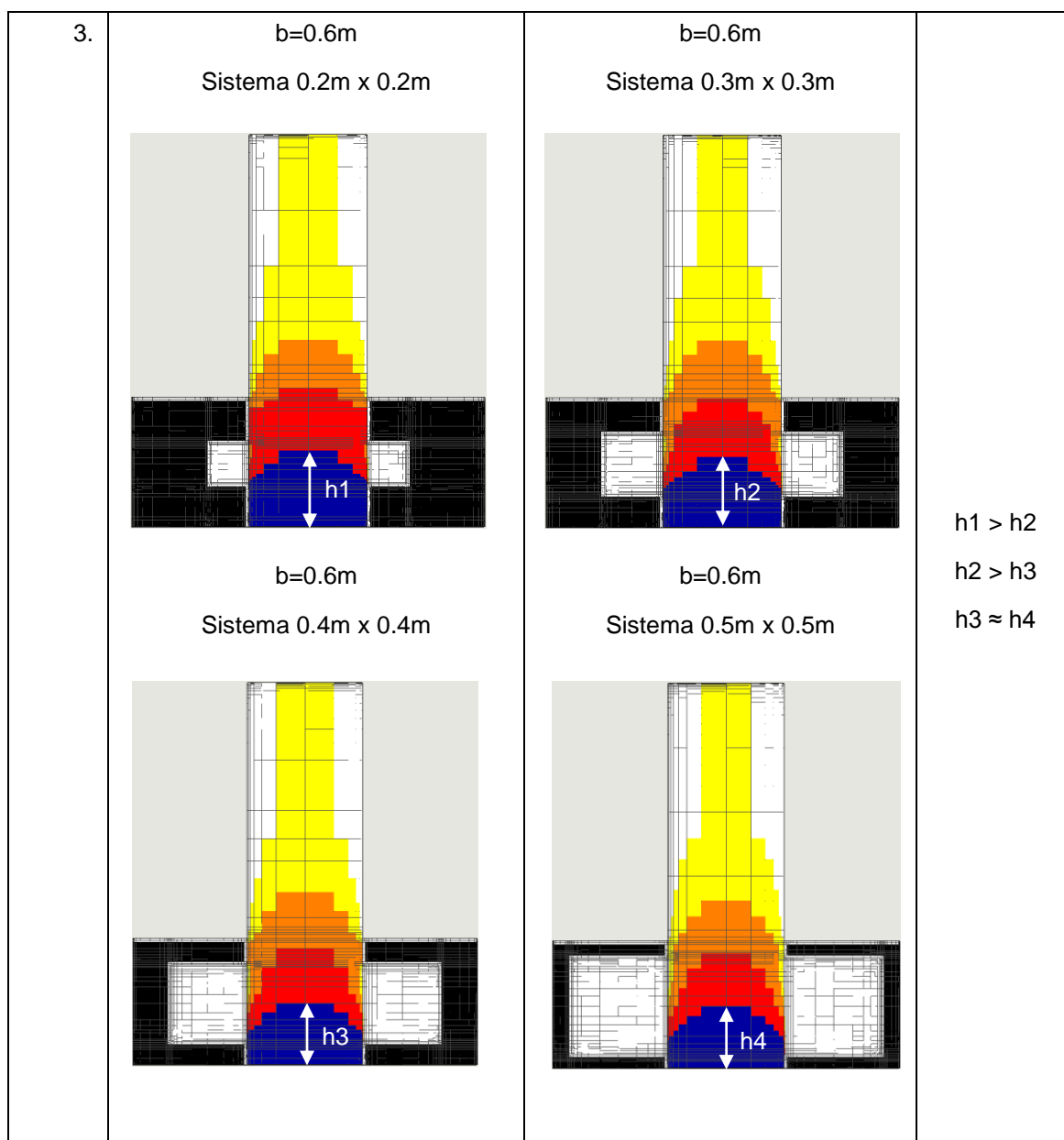
4.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Na sequência da realização deste trabalho foi possível obter informações importantes relativamente à definição de um sistema de ventilação da base das paredes para a secagem de paredes na sequência de inundações ou cheias:

1. Os sistemas de ventilação são mais eficazes para espessuras menores;
2. O aumento do Rph só é produtivo até um valor ótimo: 57.6 h^{-1} ;
3. O aumento da geometria do sistema de ventilação só se justifica até às dimensões $0.4\text{m} \times 0.4\text{m}$. A partir dessa configuração h_{max} tende a estabilizar.

Tabela 4.8 – Esquematização das conclusões finais

Conclusões finais			
1.			$b1 < b2$ \Downarrow $h1 < h2$
2.	$b=0.4\text{m} \mid \text{Rph}=21.6\text{h}^{-1}$ 	$b=0.4\text{m}$ $\text{Rph}=57.6\text{h}^{-1}$ $\text{Rph}=72\text{h}^{-1}$ 	$h1 > h2 \approx h3$



6

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES FINAIS

Com desenvolvimento deste trabalho algumas conclusões podem ser retiradas:

- As inundações, causadas maioritariamente por cheias, são frequentes em Portugal tornando os edifícios do património nacional mais vulneráveis. Existe uma tendência para o aumento destes fenómenos e portanto torna-se necessário tomar medidas para precaver e tratar as suas consequências;
- A presença de água nos edifícios pode-se manifestar de várias formas e os problemas que daí possam surgir poderão ser mais ou menos graves dependendo das condições de evaporação, espessura, porosidade dos materiais e presença de sais;
- O impacto das inundações/cheias tende a agravar no futuro com as constantes alterações climáticas, nomeadamente o aumento da temperatura;
- É necessário ter em conta as várias propriedades dos materiais, clima interior e exterior e composição dos edifícios;
- O sistema de ventilação estudado para tratar a humidade ascensional das paredes traz também resultados positivos para a secagem na sequência de inundações/cheias. O dispositivo HUMIVENT permite efetuar a secagem de paredes através de um sistema higo-regulável;
- Para melhores resultados tanto o sistema de ventilação como o terreno foram impermeabilizados com uma membrana de baixa porosidade para não permitir a passagem de humidade;
- De acordo com as condições definidas para as simulações do sistema de ventilação foi possível comprovar que a sua implantação traz resultados significativos na redução de frente húmida;
- O sistema, embora seja mais eficaz quando menor for a espessura, permite diminuir significativamente a altura de frente húmida da parede qualquer que seja a sua espessura;
- Só é produtivo aumentar o número de renovações horárias do sistema de ventilação até um certo valor. Para as condições estabelecidas foi encontrado o valor ótimo de aproximadamente

60h⁻¹. O mesmo se passa com a geometria do canal de ventilação. Só até as dimensões de 0.40m x 0.40m é que se torna interessante a sua aplicação, nas condições aqui consideradas sendo necessário adaptar esta análise noutras circunstâncias.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No seguimento deste trabalho, poderão ser efetuados outros avanços, apresentando-se aqui propostas para desenvolvimentos futuros:

- As simulações apresentadas podem ser repetidas para uma constituição da parede diferente sendo interessante analisar as diferenças quando se está perante materiais de construção distintos;
- A melhor solução encontrada por simulação numérica pode ser testada em laboratório;
- A melhor solução encontrada por simulação numérica pode ser implantada e monitorizada numa igreja;
- Poderá ser interessante avaliar a influência das juntas;
- Seria interessante variar o clima bem como outras propriedades que muito influenciam a eficácia do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://www.prociv.pt/RiscosVulnerabilidades/RiscosNaturais/Cheias/Pages/Oquee.aspx>. [Accessed: 21-Mar-2015].
- [2] C. Ramos, “*Perigos naturais devidos a causas meteorológicas: o caso das cheias e inundações*”, *e-LP Engineering and Technology Journal*, vol. 4.
- [3] A. R. B. Dias, “*Análise de risco de cheia: desenvolvimento de um modelo aplicado ao Património Nacional*”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [4] <http://www.defesacivil.mg.gov.br/conteudo/arquivos/manuais/Manuais-de-Defesa-Civil/Como-agir-em-Inundacoes.pdf>. [Accessed: 23-Mar-2015].
- [5] http://pt.wikipedia.org/wiki/Bacia_hidrográfica. [Accessed: 25-Mar-2015].
- [6] J. Azevedo, “*Situações de risco : cheias e inundações Factores condicionantes das cheias : Causas das cheias e inundações*” 1995.
- [7] http://www.pseau.org/outils/ouvrages/ersar_hidrologia_urbana_conceitos_basicos_2010.pdf. [Accessed: 26-Mar-2015].
- [8] A. a. L. S. Duarte, “*Impacto das alterações climáticas na gestão da água*”, *Rev. águas e resíduos*, vol. ISSN 0873-, pp. 58–73, 2007.
- [9] http://www.minerva.uevora.pt/odimeteosol/altera_clima.htm. [Accessed: 25-Mar-2015].
- [10] http://ec.europa.eu/clima/change/consequences/index_pt.htm. [Accessed: 25-Mar-2015].
- [11] http://www.siam.fc.ul.pt/SIAM_SumarioExecutivo.pdf. [Accessed: 20-Apr-2015].
- [12] http://www.emdat.be/disaster_list/index.html. [Accessed: 26-Mar-2015].
- [13] http://w3.ualg.pt/~jdias/GEOLAMB/GA3_cheias/GA35_CheiasPortugal/GA35_cheiasPortugal.html. [Accessed: 26-Mar-2015].
- [14] A. S. Guimarães, “*Caracterização experimental do funcionamento de sistemas de ventilação da base das paredes para tratamento da humidade ascensional*”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.
- [15] [https://cld.pt/dl/download/c4b3f4e8-14a0-4a03-8338-0dbb325bfb4d/Humidade na Constru%C3%A7%C3%A3o/Apoio Aulas/CTR_11_Humidade-na-construcao.pdf](https://cld.pt/dl/download/c4b3f4e8-14a0-4a03-8338-0dbb325bfb4d/Humidade%20na%20Constru%C3%A7%C3%A3o/Apoio%20Aulas/CTR_11_Humidade-na-construcao.pdf). [Accessed: 08-Apr-2015].
- [16] V. Freitas; I. Torres; A. Ascensão; P. Gonçalves, “Tratamento da humidade ascensional na igreja de Vilar de Frades”. *Revista Património, estudos*, pp. 54-62, 2002.
- [17] A. S. Guimarães Teixeira, “Dimensionamento de sistemas de ventilação da base das paredes A. S. Guimarães Teixeira, “*Dimensionamento de sistemas de ventilação da base das paredes*

para tratamento da humidade ascensional”, Dissertação de Douturamento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.

- [18] http://www.itise.pt/?cont_=ver&id=395&tem=132. [Accessed: 18-Apr-2015].
- [19] I. Torres, and O. López, “*Ventilation system for drying out buildings after a flood*”, 1st International Symposium on Building Pathology, ISBP 2015.
- [20] M. J. A. Morais, “*Simulação Numérica Da Humidade Ascensional Em Edifícios Históricos*”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
- [21] N. S. de A. Silva, “*Simulação numérica da influência da interface no fenómeno da humidade ascensional - Wufi 2D*”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [22] http://covildolobo.no.sapo.pt/7ano/Mat.Apoio.CN_7/rochas_magmaticas.pdf. [Accessed: 11-May-2015].
- [23] N. M. Ramos, “*A importância da inércia higroscópica no comportamento higrotérmico dos edifícios*”, Dissertação em Douturamento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.
- [24] J. A. Pinheiro, “*Importância do clima exterior e interior na quantificação do desempenho higrotérmico dos edifícios*”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [25] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Clima>. [Accessed: 13-May-2015].
- [26] <http://www.infoescola.com/meteorologia/umidade-relativa-do-ar/>. [Accessed: 13-May-2015].